

Bachelorarbeit

Entwicklung und Validierung des GCH4
Versorgungssystem für einen Raketenbrennkammer
-Prüfstand mittels Ecosim/ESPSS

von Schraven, Leonard
Matrikelnummer: 344326

Diese Arbeit wurde vorgelegt am
Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen

Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

1. Prüfer: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Michael Oschwald
2. Prüfer: Felix Wrede, M.Sc.

Betreuer: Felix Wrede, M.Sc. (IST)
Betreuer: Sebastian Klein, M.Sc. (DLR)

Aachen, 13. Oktober 2020

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	ii
Tabellenverzeichnis	iii
Formelzeichen	vii
0.1 Lateinische Buchstaben	vii
0.2 Griechische Buchstaben	vii
Abkürzungen	ix
1 Einleitung	1
1.1 Vorstellung LUMEN	1
1.2 Motivation der Arbeit	2
2 Grundlagen	5
2.1 Triebwerksprüfstände	5
2.2 P8	5
2.3 Simulation	7
2.3.1 EcosimPro	7
2.3.2 ESPSS	7
2.3.3 Fluid-Properties	8
2.3.4 Fluid-Flow-1D	8
2.3.5 Control und eigene Komponenten	12
2.4 Kennzahlen	13
2.5 Normierung	14
3 Modellbildung	15
3.1 Aufbau Prüfstand	15
3.1.1 GCH4 System	16
3.1.2 Transferleitung	16
3.1.3 GH2 Fahrleitungen	17
3.2 Ablauf des Versuchs	17
3.3 Aufbau des Schaltbilds in EcosimPro	20
3.3.1 GCH4 System	20
3.3.2 Transferleitung	21
3.3.3 GH2 Fahrleitungen	21
3.4 Aufbau der Massenstromregelung in EcosimPro	22
3.5 Aufbau des Workflows für den späteren Gebrauch	24
3.6 Wärmeübergang	24
3.6.1 Wärmeübergang außen am Rohr	25
3.7 Initialbedingungen	27
3.8 Randbedingungen	27
3.8.1 Interface	28
3.8.2 Fackel	29
4 Validierung	31
4.1 P1	31
4.2 P2	32

4.3	P3	32
4.4	T1	33
4.5	P4	34
4.6	P5	34
4.7	T2	35
4.8	P6	35
4.9	T3	36
4.10	Massenstrom und Regelung	36
4.11	Druckverlust	37
4.12	Wärmestrom	38
4.13	Test der Übertragbarkeit	39
	4.13.1 Lauf B	39
	4.13.2 Lauf C	41
4.14	Sensitivitätsanalyse	43
5	Fazit	45
	Literatur	47

Abbildungsverzeichnis

1.1	Triebwerkszyklus LUMEN [1]	2
2.1	Test des Prometheus Gasgenerators [2]	6
2.2	Überblick über Komponenten der Fluid-Flow-1D Bibliothek [3]	9
2.3	Cavity Wall Komponente [3]	10
2.4	Diskretisierung einer Pipe Komponente [3]	11
2.5	PID Regler [4]	12
2.6	AV Reader	12
2.7	Block zum Einlesen der Sequenz	13
2.8	Sensor	13
3.1	Schematischer Aufbau des Methan Versorgungssystems	15
3.2	EcosimPro Modell des GCH4 Versorgungssystems	20
3.3	Verschaltung der Regeleinrichtung	23
3.4	Excel Nutzeroberfläche	25
3.5	Wärmeübergangskoeffizient bei natürlicher Konvektion	27
3.6	Initialbedingungen	28
3.7	Druckrandbedingung P6 (a), Amplitude der Fourier Transformaten (b), Datenaufbereitung (c), Zustand am Interface (d)	30
4.1	Drucksensoren P1 (a), P2 (b)	32
4.2	P3 (a), P3 Detailansicht (b), T1 (c), T1 Detailansicht (d)	33
4.3	Validierung P4	34
4.4	P5 (a), T2 (b)	35
4.5	P6 (a), T3 (b)	36
4.6	Validierung der Ventilposition und des Massenstroms	37
4.7	Druckverlust (a), Wärmestrom (b)	38
4.8	Lauf B: Drucksensoren P1 (a), P3 (b), P5 (c), P6 (d)	40
4.9	Lauf B: Temperatursensoren T1 (a), T2 (b)	41
4.10	Lauf B: Massenstromregelung	41
4.11	Lauf C: Drucksensoren P1 (a), P3 (b), P5 (c), P6 (d)	42
4.12	Lauf C: Temperatursensoren T1 (a), T2 (b)	43
4.13	Lauf C: Massenstromregelung	43
4.14	Drucksensoren P3 (a), P5 (b)	44

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht der restlichen Komponenten Fluid-Flow-1D [3]	11
3.1	Ablauf des modellierten Versuchs	19
3.2	Regelparameter	23
4.1	Initialbedingungen der modellierten Läufe	39

Formelzeichen

0.1 Lateinische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
D	Durchmesser	m
F	Schub	N
G	Flächenbezogener Massenstrom	$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$
L	Länge	m
P	Druck	bar
\dot{Q}	Wärmestrom	J/s
T	Temperatur	K
V	Volumen	m^3
a	Faktor Tiefpassfilter	-
b	Faktor Set Point Change	-
c	Faktor Anti-Windup	-
c_p	spezifische isobare Wärmekapazität	J/kgK
f	Frequenz	Hz
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h	Enthalpie	J/kg
k_d	Faktor Dämpfung	-
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
t	Zeit	s
u	innere Energie	J/kg
u	Strömungsgeschwindigkeit	m/s

0.2 Griechische Buchstaben

Zeichen	Bedeutung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
β	Wärmeausdehnungskoeffizient	-
η	dynamische Viskosität	Pa s
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
ρ	Dichte	Kg/m^3
ζ	Druckverlustbeiwert	-

Abkürzungen

1-D	Eindimensional
ASL	Airbus Safran Launchers
AUSM	Advection Upwind Splitting Method
CNES	Centre national d'études spatiales
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EL	EcosimPro Simulation Language
ESA	European Space Agency
GCH ₄	gasförmiges Methan
GH ₂	gasförmiger Wasserstoff
Gr	Grashofzahl
GUI	grafische Benutzeroberfläche
IST	Institut für Strahlenantriebe und Turboarbeitsmaschinen
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LCH ₄	flüssiges Methan
LCUSP	Low Cost Upper Stage Propulsion Program
LOX	flüssiger Sauerstoff
LUMEN	Liquid Upper Stage Demonstrator Engine
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Nu	Nusseltzahl
P8	Prüfstand 8
pos	Ventilposition
Pr	Prandtlzahl
Re	Reynoldszahl
RMS	bewegtes quadratische Mittel
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
SLM	selektives Laserschmelzen
SSC	Stennis Space Center

1 Einleitung

1.1 Vorstellung LUMEN

In einem chemischen Raketentriebwerk wird die in Brennstoff und Oxidator gespeicherte chemische Energie, in einer Brennkammer, bei hohem Druck, in thermische Energie umgewandelt. Die heißen Reaktionsprodukte mit Temperaturen bis 4100 K werden anschließend in einer konvergent-divergenten Düse entspannt und dabei auf Geschwindigkeiten von bis zu 4300 m/s beschleunigt [5]. Um hohen Druck in der Brennkammer bei niedrigem Druck in den Tanks zu erreichen, werden häufig Turbopumpen zur Förderung der Treibstoffe eingesetzt. Dies kann in verschiedenen Verschaltungen, genannt Triebwerkszyklen, ausgeführt werden [5].

Im Projekt Liquid-Upper-Stage-Demonstrator-Engine (LUMEN) des DLR, wird ein Triebwerk der 25kN Schubklasse für den reinen Prüfstandbetrieb am P8.3 (Kap. 2.2) entwickelt [1]. Durch einen modularen Aufbau, soll das Triebwerk eine vielseitige Testmöglichkeit für zukünftige Komponentenentwicklungen bieten [1]. Neben diesen Arbeiten auf Komponentenebene, soll mit diesem Projekt Kompetenz in Entwicklung und Betrieb eines gesamten Triebwerkszyklus erlangt werden [6].

Das Triebwerk ist als Expander Bleed Zyklus [7] mit der immer relevanter werdenden Treibstoffkombination aus flüssigem Sauerstoff (LOX) als Oxidator und flüssigem Methan (LCH₄) als Brennstoff ausgeführt [6]. Abb. 1.1 zeigt schematisch den Aufbau des Triebwerks. Ein Teil des Brennstoffes wird an der Brennkammer und Düse entlanggeführt um diese zu kühlen. Dabei wird dem Brennstoff Wärme zugeführt. Der restliche Brennstoff wird der Hauptbrennkammer zugeführt. Nach Kühlung der Brennkammer wird der erhitzte Brennstoffmassenstrom erneut geteilt. Ein Teil treibt die Turbinen an und wird anschließend in die Umgebung entspannt. Der andere Teil wird im Treibstoffmischer (MIXER in Abb. 1.1) wieder dem kalten Brennstoff zugeführt, bevor dieser in die Hauptbrennkammer eingespritzt wird [7]. Die Verteilung der Massenströme kann über Ventile RCV, XCV und FCV (Abb. 1.1) gesteuert werden. Durch diese Steuerbarkeit der Einspritzbedingungen ist ein großer Betriebsbereich möglich, der für dieses Projekt viele Vorteile bietet. Ein ähnliches System wird in dem Japanischen Triebwerk LE-5B verwendet [1].

Die für ein fliegendes Triebwerk wichtigen Designziele, geringes Gewicht, geringer Platzverbrauch und hoher spezifischer Impuls, werden hier weniger wichtig bewertet, als ein möglichst stabil laufendes, thermodynamisch repräsentatives Triebwerk. Dieses soll durch den modularen Aufbau einfache Test neuer Komponenten im Zusammenhang eines gesamten Triebwerks und eine einfache Positionierung von Messtechnik ermöglichen. Aus

Kostengründen soll das Triebwerk oft wiederverwendet werden können [1].

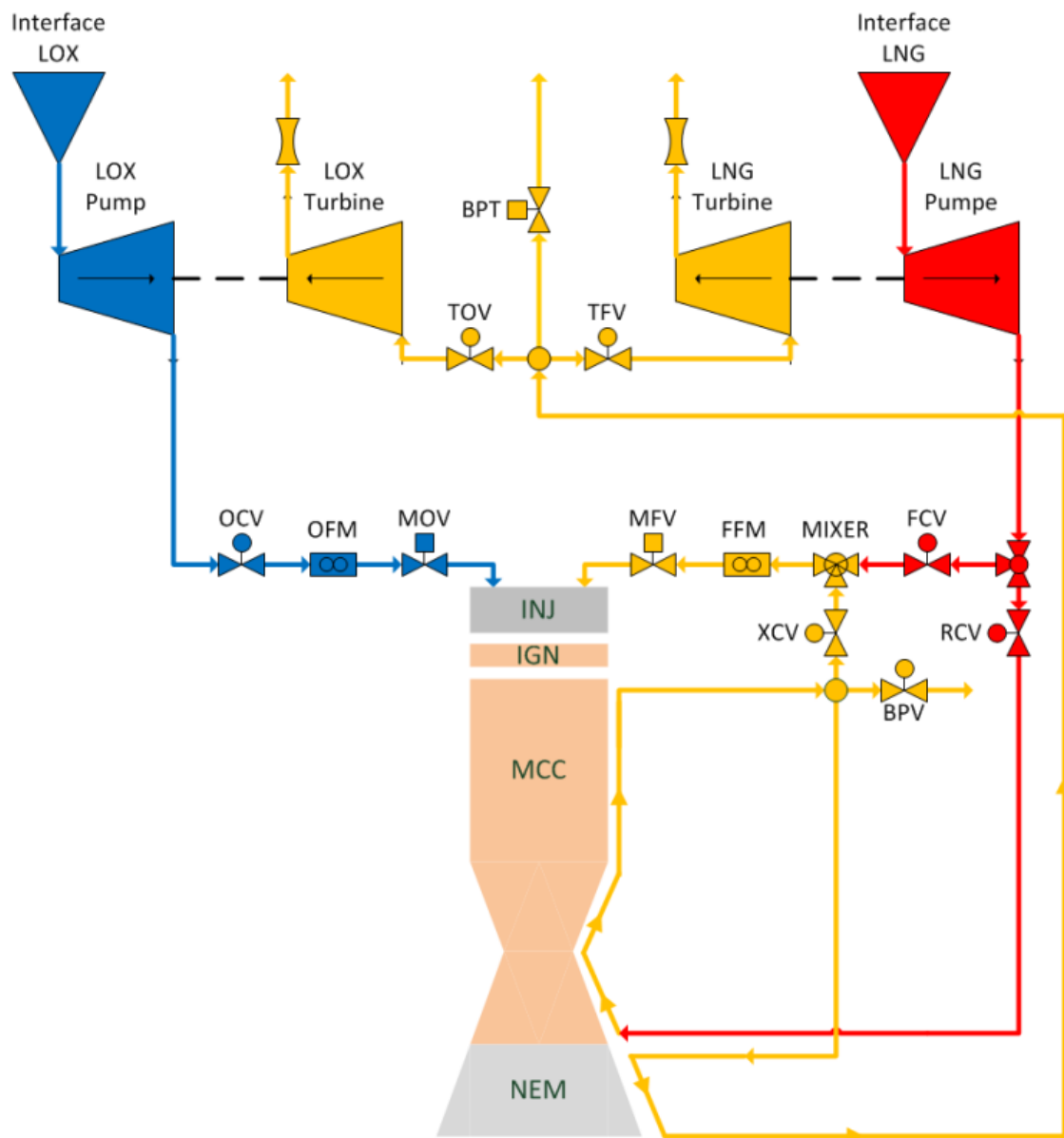


Abbildung 1.1: Triebwerkszyklus LUMEN [1]

1.2 Motivation der Arbeit

In Zukunft sollen Versuchsläufe am P8 im Vorhinein besser abgeschätzt werden. Dies soll eine Kosten- und Zeitersparnis ermöglichen, da weniger Läufe benötigt werden und deren Abbruch verhindert werden kann. Zu diesem Zweck wird ein eindimensionales (1-D) Modell eines Tests an einer LUMEN Brennkammer erstellt. Zunächst wird das Modell in die vier Teilstücke, Versorgungssysteme für LOX, LCH₄ und GCH₄ sowie das Trieb-

werk, aufgeteilt. Inhalt dieser Arbeit ist das Erstellen des Modells des GCH4 Systems. Besonderer Wert wird hierbei auf die richtige Prädiktion des Drucks in stationären, wie auch transienten Betriebspunkten gelegt. Neben den Anforderungen an die Genauigkeit, werden auch die wirtschaftlichen Aspekte betrachtet, um eine möglichst effizient nutzbare Simulation zu erhalten.

Nach Erläuterung der nötigen Grundlagen, wird im Kap. 3 mit der Analyse des GCH4 Systems und der Erstellung eines Schaltplans begonnen. Daraufhin wird aus dem gesamten Modell ein Vereinfachtes erstellt, in dem nur noch die für die Modellierung relevanten Teile enthalten sind. Dieses Modell wird in EcosimPro überführt und alle bekannten Parameter implementiert. Daraufhin werden aus den Messdaten die Rand- und Initialbedingungen erstellt und eine Abschätzung des Wärmeübergangs an den Rohren errechnet. Da die reale Regelung unbekannt ist, wird ein Block zum Regeln und Steuern des Massenstroms in EcosimPro umgesetzt. Nach abgeschlossener Modellierung werden anhand eines realen Versuchslaufs die unbekannten Parameter iterativ ermittelt. In Kap. 4 werden die Ergebnisse der Simulation mit den realen Messdaten verglichen und somit die Gültigkeit der Simulation gezeigt. Begonnen wird mit einem direkten Vergleich der Druck- und Temperaturwerte, gefolgt von einem Vergleich des Massenstroms und der Ventilstellung des Regelventils. Anhand dieser Werte wird eine Auswertung des Druckverlusts und des Wärmestroms durchgeführt. Anschließend wird die Übertragbarkeit auf andere Läufe, anhand zweier Tests der selben Kampagne, gezeigt. Abschließend wird eine Sensitivitätsanalyse erstellt, in der die Auswirkungen von Druckänderungen am Interface auf das Versorgungssystem untersucht werden.

2 Grundlagen

2.1 Triebwerksprüfstände

Alle Triebwerke für die Raumfahrt werden vor ihrem operativen Einsatz in verschiedenen Testkampagnen stationär getestet. Dies beginnt mit Tests an einzelnen Komponenten und skalierten Prototypen, gefolgt von Entwicklungs- und anschließenden Qualifikationstests am vollständigen Triebwerk. Bei diesen Tests können unterschiedliche Bedingungen getestet werden, angefangen von Läufen unter Bodenbedingungen mit einem einzelnen Triebwerk, bis hin zu Tests gesamter Raketenstufen oder Tests unter simulierten Höhenbedingungen. Auch Bedingungen im Off-Design werden getestet, um auch bei leichten Anomalien im Flug, einen sicheren Betrieb gewährleisten zu können. Hierzu zählen Tests mit Aufprägung von Schwingungen verschiedener Frequenzen und Amplituden [5]. In dieser Arbeit geht es um den Betrieb auf einem Brennkammerprüfstand für Triebwerke in der Größenordnung bis 100 *kN* Schub. Da bei dieser Art von Prüfstand ohne Pumpen getestet wird, die Brennkammer aber dennoch bei hohem Druck betrieben wird, bietet diese Art der Prüfstände die besondere Herausforderung, dass das gesamte Versorgungssystem mit hohem Druck betrieben werden muss.

Weltweit gibt es viele weitere Brennkammerprüfstände. Beispielsweise betreibt die NASA im Stennis Space Center (SSC) den Testkomplex E-3. Hier kann in der ersten Testzelle in horizontaler Brennkammerposition bis zu 60000 *lbf* (267 *kN*) Schub getestet werden. Die Treibstoffzufuhr kann Drücke bis zu 3000 *psi* (207 *bar*) bereitstellen. Auch im Marshall Spaceflight Center betreibt die NASA einen ähnlichen Prüfstand [8]: Am Prüfstand 115 wurde 2016 im Rahmen des Low-Cost-Upper-Stage-Propulsion-Program (LCUSP) der NASA eine, mittels selektiven Laserschmelzens (SLM) aus Kupfer gefertigte, Brennkammer getestet [9]. Auch die japanische Raumfahrtbehörde (JAXA) betreibt einen solchen Prüfstand. In der Tashiro Test Facility wurde unter anderem die Injektorplatte und obere Brennkammer des LE-9 Triebwerks getestet [10]. Hierbei traten während der ersten Testkampagne hochfrequente Druckschwingungen auf, die für einen zweiten Test reduziert werden konnten [10].

2.2 P8

Der Forschungs- und Technologieprüfstand P8 des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) Instituts für Raumfahrtantriebe in Lampoldshausen wurde im Jahr 1995 als Gemeinschaftsprojekt des DLR, Airbus Safran Launchers (ASL), heute ArianeGroup und der französischen Raumfahrtbehörde Centre national d'études spatiales (CNES) aufgebaut und in Betrieb genommen. In über 20 Jahren des Betriebs, wurden an

mehr als 1400 Tagen Heißläufe durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Tests an Versuchsträgern mit bis zu 330 *bar* Brennkammerdruck abgeschlossen [11].

Um an bis zu 100 Tagen im Jahr testen zu können, muss die Rüstzeit zwischen den Tests kurz gehalten werden. Um dies zu ermöglichen, besteht P8 aus 2 identischen Testzellen, P8.1 und P8.2, die sich ein gemeinsames Versorgungssystem teilen [11]. Ein anderes Beispiel für Tests am P8 sind die in den Jahren 2017 und 2018 abgeschlossenen Kampagnen am Gasgenerator des Prometheus Triebwerks. Ein solcher Test ist in Abb. 2.1 gezeigt. Diese, vollständig additiv gefertigte, Komponente wurde in über 1300 *s* Tests unter stationären Bedingungen auf Verbrennungseffizienz, thermische Stratifikation und Stabilität untersucht [2].

Neben dem Prüfstand P8 gibt es einen weiteren Prüfstand für Brennkammertests am selben Standort. An P3 können Tests an Brennkammern mit höherem Schub als an P8 getestet werden. Beispielsweise wurde das VINCI Triebwerk der Ariane 6 während der Entwicklung dort getestet [12].



Abbildung 2.1: Test des Prometheus Gasgenerators [2]

2.3 Simulation

2.3.1 EcosimPro

EcosimPro ist eine Simulationssoftware zum Lösen kontinuierlich- diskreter, dynamischer Probleme. Hierbei ist EcosimPro in der Lage die komplexen Problemstellungen, Sortieren der Gleichungen, Optimierung des numerischen Codes und Lösen von linearen, wie auch nichtlinearen System, zu übernehmen [13].

Der im Programm verwendete objektorientierte Ansatz bietet einige entscheidende Vorteile gegenüber dem klassischen blockorientiertem Ansatz. Die grundlegenden Objekte werden Komponenten genannt und enthalten alle Daten, gewöhnlichen Differenzialgleichungen und differential-algebraischen Gleichungen. Sie modellieren das Verhalten eines physikalischen Teilsystems [13]. Diese Datenkapselung für die einzelnen Komponenten kann die globale Datenmenge reduzieren und die Komplexität wird versteckt, da nur ein Teil der Komponente für den Nutzer im Graphical-User-Interface (GUI) einsehbar ist [13]. Eine weitere Reduktion der Datenmenge wird durch Nutzung von Vererbung erreicht. Hier der Code einer abstrakten Komponente, die so nicht im Modell verbaut wird, zum Erstellen von komplexeren Komponenten auf deren Grundlage genutzt. Durch Nutzung des Konzepts Aggregation können Komponenten mehrfach genutzt werden, indem mehrere Instanzen erstellt werden. Änderungen an der Struktur der Komponente werden von jeder Instanz übernommen, während die Parameter individuell eingestellt werden [3].

Diese Komponenten können durch Verbindungen in Schaltbildern zu neuen Komponenten zusammengefasst werden. Alternativ können diese auch direkt vom Nutzer in der EcosimPro Language (EL) programmiert werden [13]. Anders als bei der klassischen, blockorientierten, Modellbildung die beispielsweise in Simulink verwendet wird, werden hier die Schnittstellen der Komponenten mit ungerichteten Pfaden verbunden [14]. An diesen Schnittstellen werden 2 verschiedene Variablentypen bilanziert: Potentialgrößen, beispielsweise Druck oder Spannung, werden gleichgesetzt. Flussvariablen, beispielsweise Massenstrom oder Strom werden hier zu null summiert [14].

2.3.2 ESPSS

European-Space-Propulsion-System-Simulation (ESPSS) ist ein Satz an Bibliotheken, der speziell für Raumfahrtanwendungen erstellt wurde. Dieser wurde im Auftrag der europäischen Raumfahrtbehörde (ESA) entwickelt und soll eine einheitliche Simulationsplattform für die europäische Raumfahrt bieten [3]. Für diese Arbeit werden Komponenten der ESPSS Bibliothek Fluid-Flow-1D, der EcosimPro Bibliothek CONTROL sowie eigens für P8 erstellte Komponenten verwendet. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt.

2.3.3 Fluid-Properties

Die Bibliothek FLUID-PROPERTIES stellt die Grundlage von ESPSS dar. Hier sind alle Daten zu den verwendbaren Fluiden gespeichert [3]. Zusätzlich besteht die Möglichkeit eigene Fluide zu definieren. Hier ist aus perfekten Gasen und Flüssigkeiten, die als eindimensionale Tabelle eingelesen werden und realen Fluiden die in 2-D Tabellen interpoliert werden zu wählen. Zusätzlich kann ein weiteres, nicht kondensierbares, Fluid eingefügt werden. Auch dieses kann ein reales Fluid sein, darf aber nur in gasförmiger Phase vorliegen. Die Zustände der beiden Fluide werden durch ein homogenes Gleichgewichtsmodell bestimmt, das auch eine Lösung der gasförmigen Komponente in der Flüssigen erlaubt. Auch Verbrennungsprodukte als Mischung vieler Spezies können hier ausgewählt werden [3].

2.3.4 Fluid-Flow-1D

Diese Bibliothek beinhaltet alle grundlegenden strömungsführenden Bauteile wie Rohre, Drosseln und Ventile für die Nutzung in transienten Simulationen. Ein Überblick wird in Abb. 2.2 gegeben. Hierbei ist die Formulierung der Komponenten unabhängig vom gewählten Fluid. Diese Daten werden aus der FLUID-PROPERTIES Bibliothek eingelesen [3]. Die Auswahl des Fluides und des zusätzlichen, nicht kondensierbaren, Fluids erfolgt durch die WorkingFluid Komponente.

Grundlegend lassen sich die Komponenten in Fluidnetzwerken in 2 Klassen aufteilen, die immer abwechselnd angeordnet sind: Resistive und kapazitative Komponenten. Erstere verfügen über keinen Speicher, erhalten die Zustandsvariablen der nebenliegenden kapazitiven Komponente als Eingang und errechnen daraus die Flussvariablen. Im Gegensatz dazu berechnen letztere über Integration der Flussvariablen die Zustandsvariablen [3]. Zunächst werden einzelne Komponenten ausführlicher vorgestellt, gefolgt von einer Übersicht weiterer Komponenten in Tab. 2.1.

Abstract Junction

Die in Abb. 2.2 gezeigte Abstract Junction stellt die Grundlage der verwendeten resisitiven Komponenten dar. Dazu werden die in den Gleichungen 2.1 und 2.2 gezeigten Erhaltungsgleichungen der Masse m und der Enthalpie h verwendet [3].

$$m_1 = m_2 = m \quad (2.1)$$

$$mh_1 = mh_2 = mh \quad (2.2)$$

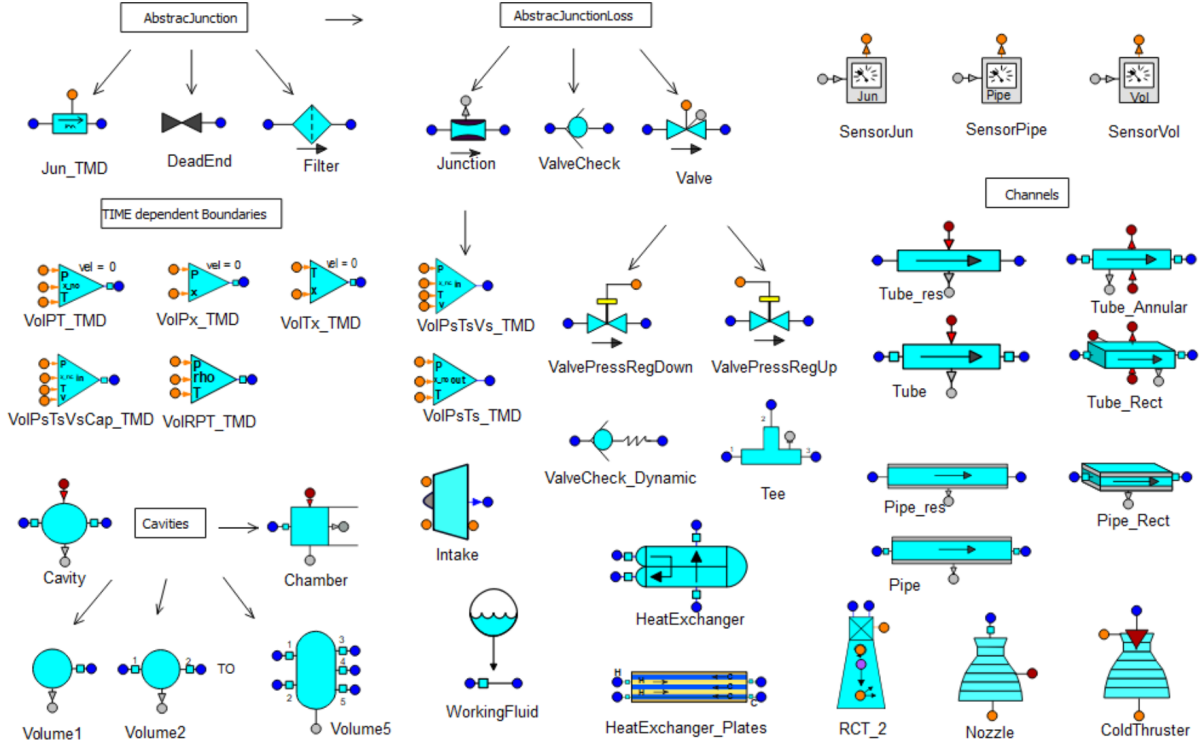


Abbildung 2.2: Überblick über Komponenten der Fluid-Flow-1D Bibliothek [3]

Abstract Junction Loss

Die Abstract Junction Loss erbt die Formulierung der Abstract Junction und erweitert diese um eine Modellierung des Druckverlusts. Diese ist in Gl. 2.3 aufgeführt [3]. Des Weiteren wird eine Limitierung bei Schallgeschwindigkeit eingeführt [3].

$$(I_1 + I_2) \left(A \cdot \frac{dG}{dt} + G \cdot \frac{dA}{dt} \right) + I_v * \frac{dG}{dt} = \quad (2.3)$$

$$\left(P + 0,5\rho v^2 \right)_1 - \left(P + 0,5\rho v^2 \right)_2 - 0,5(\zeta + \zeta_{\text{crit}}) \frac{G|G|}{\rho_{up}}$$

Hierbei beschreibt P den statischen Druck und $0,5\rho v^2$ den dynamischen Druck an der jeweiligen Schnittstelle des angrenzenden Volumens. A ist die Ventilfläche und G der, auf die Fläche bezogene, Massenstrom. Neben den Formulierungen für den Einfluss des stationären Druckverlusts wird auch das Momentum I betrachtet. Abschließend beschreibt Zeta (ζ) einen Druckverlustbeiwert [3].

Cavity-Wall

Diese Komponente erbt von der abstrakten Komponente Capacity. Letztere beschreibt ein nicht adiabates Volumen mit mehreren Schnittstellen $f[j]$ und verwendet die Bilanzgleichungen für Masse (Gl. 2.4) und Energie (Gl. 2.5) [3]. Hierbei beschreibt u die gesamte spezifische Energie bestehend aus statischem und dynamischem Teil. Q beschreibt den Wärmestrom über die Systemgrenze der Komponente [3].

$$\frac{d\rho}{dt}V + \rho \frac{dV}{dt} = \sum_{j \in Ports} m_j \quad (2.4)$$

$$\frac{d\rho}{dt}Vu + \rho \frac{dV}{dt}u + \rho V du = \sum_{j \in Ports} (mh)_j + Q_{in} - PdV \quad (2.5)$$

Bei der im Modell verwendeten Cavity-Wall Komponenten sind 2 Fluid Schnittstellen vorgesehen und zusätzlich ist ein Modell der Wand enthalten. Diese wird in Abb. 2.3 dargestellt. Hier kann der Wärmeaustausch mit dem Fluid und die Wärmeverteilung innerhalb der Wand errechnet werden. Um den Wärmeübergang nach außen zu modellieren bietet sie zusätzlich noch eine thermische Schnittstelle [3].

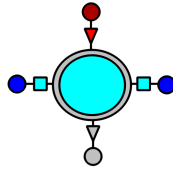


Abbildung 2.3: Cavity Wall Komponente [3]

Pipe

Im Modell werden Rohrleitungen durch die Pipe Komponente modelliert. Diese ist, wie in Abb. 2.4 dargestellt, aus abwechselnd angeordneten kapazitiven und resistiven Komponenten aufgebaut. Durch diesen Aufbau ist es möglich Querschnittsänderungen und eine variable Verteilung der Knoten in den Volumina zu erreichen [3]. Neben stationären wie instationären Reibungstermen wird auch der Druckverlust durch Turbulenz mit dem Dämpfungsfaktor k_d berücksichtigt [3]. Zusätzlich bietet auch diese Komponente eine Modellierung der Wand. Der innere Wärmeübergang kann mittels verschiedener Modelle [3] berücksichtigt werden. Für den Äußeren Wärmeübergang wird ein Wärmeübergangskoeffizient und die Außentemperatur vorgegeben.

Für die Pipe Komponente gibt es verschiedene numerische Lösungsschemata. Standardmäßig wird an dieser Stelle ein Verfahren der zentralen Differenzen verwendet. Dies bietet

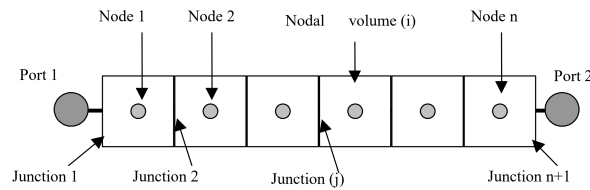


Abbildung 2.4: Diskretisierung einer Pipe Komponente [3]

vor allem den Vorteil der schnellen und zuverlässigen Konvergenz, was das Verfahren wirtschaftlich macht. Ein Schwachpunkt ist das Lösen von Überschallströmungen und Fehler bei der korrekten Wiedergabe der konzentrierten Zustandsänderung über einen Verdichtungsstoß [3]. Um in diesen Fällen eine bessere Lösung zu erhalten, werden in sogenannten Upwind Verfahren die Differenzen Stromauf der zu berechnenden Zelle stärker gewichtet [15]. Da Informationen in Überschallströmungen nur in Strömungsrichtung ausgetauscht wird, kann es diese deutlich realistischer lösen. In ESPSS sind hierzu die beiden Verfahren Roe und die Advection-Upwind-Splitting-Method (AUSM) implementiert. In diesem werden die physikalisch unterschiedlichen Effekte des Stofftransports mit der durch die Strömungsgeschwindigkeit gegebenen Advektionsgeschwindigkeit und den Transport der Druckinformationen durch akustische Wellen zum Lösen voneinander getrennt und die Ergebnisse wieder addiert [15].

Tabelle 2.1: Übersicht der restlichen Komponenten Fluid-Flow-1D [3]

Komponente	Beschreibung
Junction	<ul style="list-style-type: none"> • Bildet reale Drossel nach • Erbt von Abstract Junction Loss • Fläche A_o wird vorgegeben • Druckverlustbeiwert ζ wird vorgegeben
Valve	<ul style="list-style-type: none"> • Bildet reales Ventil nach • Erbt von Abstract Junction Loss • Variable Ventilfläche • Verwendet Verzögerungsfunktion erster Ordnung zwischen Eingang und Ventilposition
Dead Stop	<ul style="list-style-type: none"> • Modelliert Ende einer Leitung oder geschlossenes Ventil • Erbt von Abstract Junction Loss • Setzt Massenstrom zu null
Filter	<ul style="list-style-type: none"> • Erbt von Abstract Junction Loss • Andere Formulierung des Druckverlusts
Tee	<ul style="list-style-type: none"> • Modelliert Verzweigung • Zusammensetzung aus Volumen und 3 Junctions

2.3.5 Control und eigene Komponenten

PID Regler

Der PID Regler ist in ESPSS in paralleler Schaltung implementiert [4]. Das Symbol dieser Komponente wird in Abb. 2.5 gezeigt. Fehler durch Sättigung des Integrierers sollen durch Anti-Windup [4] verhindert werden, wenn der Ausgang limitiert wird und der Integrierer den Fehler weiter integriert [4]. Dies sorgt für Fehler bei erneuter Änderung der Führungsgröße. Der hierfür vorgesehene Parameter ist **c**. Zusätzlich ist ein Tiefpassfilter in Kaskade mit dem Differenzierer geschaltet, dessen Anteil mit dem Parameter **a** bestimmt wird. Dies soll verhindern, dass das hochfrequente Rauschen der Messwerte den Ausgang des Differenzierers dominiert. Zusätzlich gibt es den Faktor **b**, der mit der Sollgröße multipliziert und zum Ausgang vor dem globalen Verstärkungsblock addiert wird [4]. Die Parameter werden als Proportionalwert, Nachstellzeit und Vorhaltezeit eingegeben. Der Proportionalwert entspricht der globalen Verstärkung, die auf proportionalen, integrierenden und differenzierenden Anteil wirkt. Die Nachstellzeit entspricht der Zeit nach dem der Integrierende Anteil genauso groß ist wie der proportionale, dementsprechend bedeutet eine kleine Nachstellzeit einen im Verhältnis großen integrierenden Anteil [16]. Umgekehrt bedeutet eine lange Vorhaltezeit einen großen differenzierenden Anteil [16].



Abbildung 2.5: PID Regler [4]

AV Reader

Alle Informationen der Sequenz für den Gesamtanprüfstand bei einem Lauf sind in einer Tabelle mit den Spalten Zeit und Ventilstellung hinterlegt. Um diese in EcosimPro nutzbar zu machen wurde hier die, in Abb. 2.6 gezeigte, Komponente AV Reader programmiert, die zuerst die Daten aus einer vorher definierten Quelle einliest. Die Sequenz für das in der Komponente definierte Ventil wird dann extrahiert und als Signal ausgegeben. In der Tabelle werden die Ventilpositionen nur als 0 (geschlossen) oder 1 (offen) eingetragen, eine lineare Interpolation erfolgt in der Komponente.

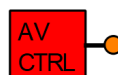


Abbildung 2.6: AV Reader

Sequenz Block

Ähnlich wie der AV Reader funktioniert der in Abb. 2.7 Sequenz Block. Da für die Regelung die drei Werte gesteuerte Ventilposition (Vpos in Abb. 2.7), Führungsgröße für die Regelung (MF) und das Umschalten zwischen diesen beiden (switch) erforderlich sind, besitzt dieser Block drei Ausgänge.

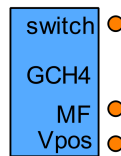


Abbildung 2.7: Block zum Einlesen der Sequenz

Sensor

Um die genauen Messpositionen und –Größen zu definieren und gleichzeitig die Übersichtlichkeit des Modells zu verbessern wir an den Modellen des P8 die in Abb. 2.8 dargestellte Komponente verwendet. Diese Daten können einfacher extrahiert werden und bieten die Grundlage für die späteren Auswertungen.

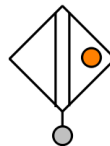


Abbildung 2.8: Sensor

2.4 Kennzahlen

Zur Berechnung des Wärmeübergangs werden verschiedene dimensionslose Kennzahlen verwendet: Die in Gl. 2.6 gezeigt Reynoldszahl (Re) beschreibt das Verhältnis aus Trägheitskräften und Reibungskräften.

$$Re_D = \frac{\rho u D}{\eta} \quad (2.6)$$

Hierbei entspricht ρ der Dichte des Fluids. u beschreibt die Strömungsgeschwindigkeit, D den Durchmesser und η die dynamische Viskosität. Konvektivem Wärmeübergang und Wärmeleitung werden über die in Gl. 2.7 gezeigte Nusseltzahl (Nu) verglichen [17].

$$Nu_D = \frac{\alpha D}{\lambda} \quad (2.7)$$

Alpha (α) ist der Wärmeübergangskoeffizient, während Lambda (λ) der Wärmeleitfähigkeit des Fluids entspricht. Das Verhältnis aus kinematischer Viskosität zur Wärmeleitfähigkeit ist durch die Prandtlzahl gegeben (Gl. 2.8) [17].

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (2.8)$$

c_p entspricht der isobaren Wärmekapazität. Abschließend wird die Grashofzahl als Kennzahl der natürlichen Konvektion vorgestellt (Gl. 2.9). Sie entspricht dem Verhältnis des statischen Auftriebs des Fluids zu den Reibungskräften mal dem Verhältnis aus Trägheitskräften zu den Reibungskräften [17].

$$Gr_D = \frac{\beta g \rho |T_w - T_\infty| D^3}{\eta^2} \quad (2.9)$$

Diese ist abhängig von der Differenz von Wandtemperatur T_w und Freistromtemperatur T_∞ . Hierbei ist β der Wärmeausdehnungskoeffizient und g die Beschleunigung durch Gravitation [17].

2.5 Normierung

Die verwendete Zeit wird anhand der Zündung bei $t_n = 0$ in 2 Bereiche unterteilt. Zur Normierung wird die in Gl. 2.10 gezeigte Gleichung verwendet. Negative Zeiten werden mit dem Beginn der Simulation als t_{ref} normiert, während für positive Zeiten das Ende der Simulation als t_{ref} verwendet wird.

$$t_n = \frac{t}{t_{ref}} \quad (2.10)$$

Zur Normierung der Messwerte wird die in Gl. 2.11 gezeigte Funktion verwendet. Damit wird aus jedem Messwert x mit den maximalen (x_{min}) und minimalen (x_{min}) Werten des jeweiligen Sensors der normierte Wert x_n ermittelt. Hierbei kann x eine beliebige Größe, beispielsweise der Druck P oder die Temperatur T sein. Die Extremwerte werden dabei immer aus den Sensordaten ermittelt um die Sensordaten und die Simulationsdaten zu normieren.

$$x_n = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (2.11)$$

3 Modellbildung

3.1 Aufbau Prüfstand

Alle in dieser Arbeit modellierten Testläufe fanden in Testzelle 2 des P8 beim DLR in Lampoldshausen statt. Im Folgenden wird der Aufbau des Versorgungssystems mit gasförmigen Methan (GCH4) für diese Testzelle beschrieben: In Abbildung 3.1 wird der schematische Aufbau des GCH4 Versorgungssystems gezeigt. Dieses wird zur besseren Verständlichkeit in 3 Teilsysteme aufgeteilt: Vorhandene Fahrleitungen für gasförmigen Wasserstoff (GH2), das neu hinzugefügte GCH4 System und die Transferleitung mit Länge L_1 dazwischen.

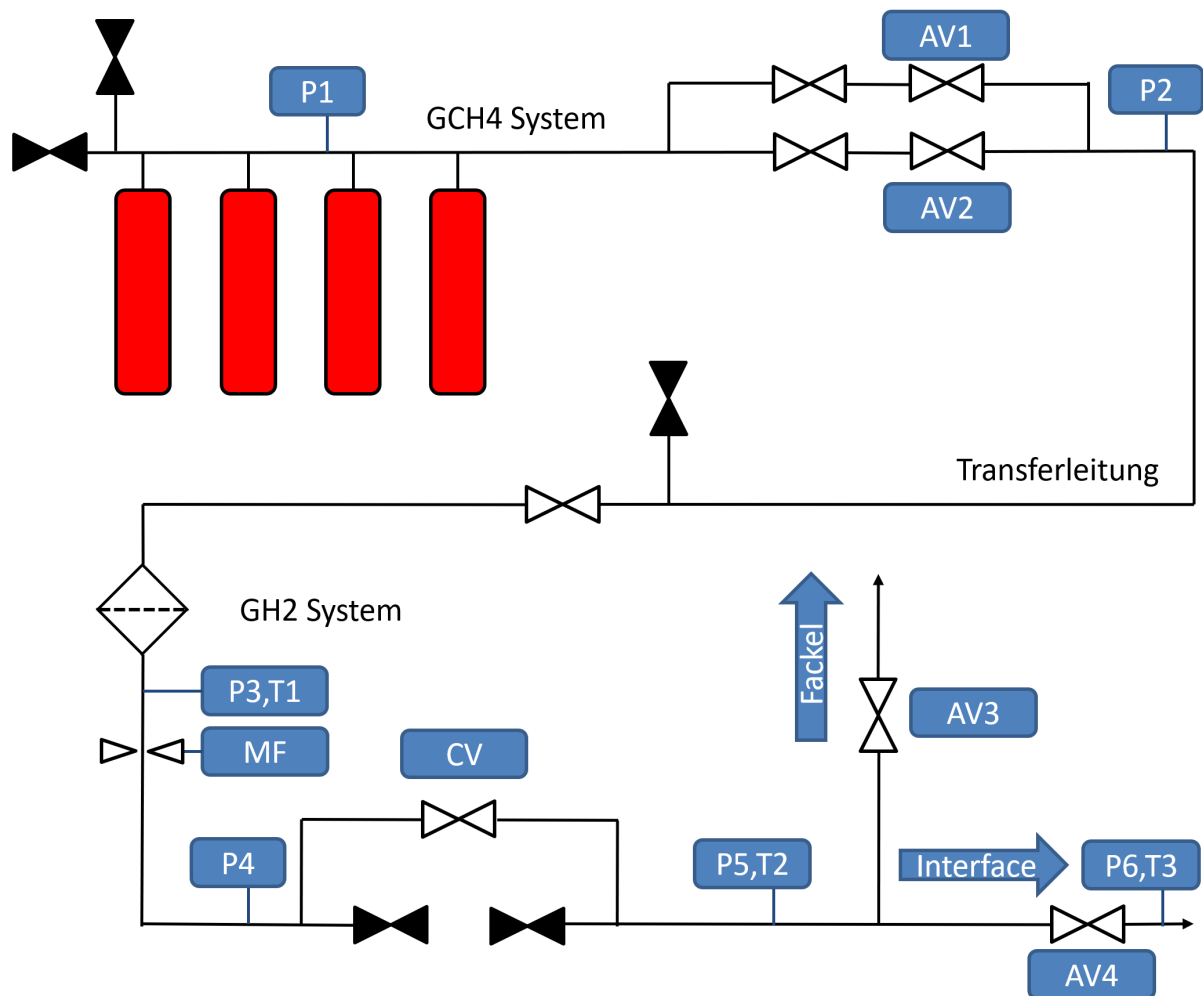


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau des Methan Versorgungssystems

3.1.1 GCH4 System

Das gasförmige Methan wird in vier Bündeln gelagert. Da der kritische Punkt des Methans bei $190,56\text{ K}$ und $45,99\text{ bar}$ ist, liegt dieses in den Flaschen als überkritisches Fluid vor. An jeder Flasche eines Bündels wird das Methan durch ein dünnes Rohr in ein Sammelrohr geführt, durch das der gesamte Massenstrom eines Bündels fließt. An jedem dieser Sammelrohre ist ein Handventil angebracht. Die Sammelrohre der 4 Bündel werden in die Hauptleitung eingespeist, wobei zwischen den mittleren beiden Bündeln der statische Druck mit dem Sensor P1 gemessen wird (P1 in Abb. 3.1). Nach dem Zusammenführen aller Bündel wird von der Hauptleitung mit dem Innendurchmesser D_1 eine Leitung mit dem geringeren D_2 abgeführt. Die beiden parallelen Leitungen haben zunächst ein weiteres Handventil, gefolgt von den automatischen Ventilen AV1 für die Nebenleitung und AV2 für die Hauptleitung.

Um Druckspitzen in den Rohren zu vermeiden, wird im Betrieb zunächst AV1 geöffnet. Dieser, Priming genannte, Vorgang sorgt für eine langsame Bedrückung der nachfolgenden Transferleitung zum GH2 System. Wenn dies vollständig abgeschlossen ist, wird auch AV2 geöffnet, um den erforderlichen Massenstrom für den Test bereitstellen zu können. Nach dem Zusammenführen der Leitungen wird erneut der Druck mit dem Sensor P2 gemessen. Bei allen bisher verwendeten Ventilen handelt es sich um Hochdruckventile in der Ausführung Kugelhahn, die im geschlossenen Zustand als vollkommen dicht angesehen werden können. Zum Spülen der Leitungen, sind, vor und nach der Ventileinrichtung, noch Zuführungen von gasförmigem Stickstoff vorgesehen. Diese sind in Abb. 3.1 vernachlässigt, da dieser Vorgang in der Modellierung nicht beachtet wird.

3.1.2 Transferleitung

Hinter den AV1 und AV2 beginnt die lange Transferleitung zum GH2 System. Nach L_1 wird die Leitung zur Versorgung der beiden Testzellen geteilt. Zum Umschalten sind in beiden Leitungen direkt nach der Teilung Handventile angeordnet, die den Strom in die nicht genutzte Testzelle verhindern. Auch hierbei handelt es sich um ähnliche Ventile des Typs Kugelhahn.

Im weiteren Verlauf der Leitung folgt nun die Einrichtung zum Umschalten zwischen GH2 und GCH4 Versorgung. Dafür ist das letzte Stück der beiden Leitungen schwenkbar ausgeführt und kann mit einem Klammerverschluss an der Fahrleitung des GH2 Systems montiert werden. Direkt hinter diesem Stück ist ein Sicherheitsventil verbaut, das bei Überdruck das System vor Schaden bewahren soll. Auch dieses ist in der Modellierung vernachlässigt.

3.1.3 GH2 Fahrleitungen

Der Innendurchmesser des GH2 Systems beträgt D_3 und fällt, bei gleichem Außendurchmesser, etwas kleiner aus als bei den bisher vorgestellten Leitungen. Des weiteren befindet sich alle Leitungen ab Beginn des GH2 Systems innerhalb der Testzelle. Nachdem das Methan aus den Flaschen in die Testzelle transferiert wurde, muss nun eine Kontrolle der Bedingungen am Interface ermöglicht werden. Da der Prüfling vor Verunreinigungen und Beschädigungen geschützt werden soll, ist die erste Komponente in diesem System ein Filter. Ab diesem wird der Innendurchmesser der Leitung für ein kurzes Rohrstück aus D_4 erweitert, der etwa dem Doppelten von D_3 entspricht. Nach dem Filter folgt die Messeinrichtung für die Massenstromregelung (MF in Abb. 3.1). Hier wird eine Messblende mit austauschbarem Einsatz verwendet. Um den Massenstrom zu berechnen müssen vor der Blende Temperatur, Druck und Druckverlust über die Blende gemessen werden. Das Druckmesssystem ist einfach redundant ausgelegt. Um die lokale Fluktuation der Strömungsgrößen möglichst gering zu halten und eine optimale Funktion der Messeinrichtungen zu gewährleisten, ist, direkt an den Filter grenzend, ein Strömungsgleichrichter im Rohr verbaut. Dieser besteht aus vielen parallel angeordneten Rohren, in denen makroskopische, turbulente Strukturen in kleinere dissipiert werden, die weniger Einfluss auf die Messblende haben [18].

Die Daten der Messblende werden für die Regelung des Regelventils (CV) verwendet. Hierbei handelt es sich um das Ventil, das die Ventilstellung je nach Einstellung steuert oder regelt. Für die Regeleinrichtung wird ein Eckventil verwendet. Je nach Massenstrom des geplanten Versuchs kommen Regelventile verschiedener Größen zum Einsatz, die entweder an die Hauptleitung, oder, bei verschlossener Hauptleitung, an eine dünnere Nebenleitung angeschlossen werden. Beim hier beschriebenen Versuch wird, wie in Abb. 3.1 zu sehen ist, ein Ventil in der Nebenleitung verwendet. Der Durchmesser des verwendeten Ventilsitzes beträgt D_{ventil} . Stromauf des Ventils wird ein weiteres Mal Druck und Temperatur gemessen, bevor die Leitung erneut geteilt wird. Eine Leitung führt über AV3 in Richtung Fackel, wo überschüssiges Methan verbrannt wird. In der Anderen öffnet AV4 die Leitung zum Interface, an das der Prüfling angeschlossen ist. Auch hier sind beide Ventile als Eckventile ausgeführt. Auf dem letzten Stück Rohr zum Interface gibt es eine weitere Versorgungsleitung zum Spülen, sowohl mit Stickstoff, als auch mit Helium. Vor dieser Zuleitung wird ein letztes Mal mit den Sensoren P5 und T3 Temperatur und Druck gemessen.

3.2 Ablauf des Versuchs

Im Folgenden wird der Ablauf des Versuchs an einer LUMEN Brennkammer beschrieben. Die verwendeten Läufe A, B und C laufen alle nach der gleichen Sequenz ab. Die für dieses System relevanten Einträge der Sequenz sind in Tab. 3.1 aufgeführt. Wie man sehen kann, beginnt diese bei Zeitpunkt $t_n = -1,8$ mit dem Schließen von AV4 und Öffnen von AV3. Diese Informationen werden als Initialbedingungen für AV3 und AV4 verwendet.

Die ersten Änderungen des Regelventils sind für das Modell uninteressant, da hier die Transferleitung noch nicht unter Druck steht und somit nur sehr geringe Massenströme fließen.

Der Startpunkt der Simulation wurde bei $t_n = 1$ gewählt, also kurz bevor AV1 geöffnet wird. Dies öffnet bei $t_n = -0,94$ und Methan beginnt die Leitung bis zum CV zu füllen. Nachdem sich der Druck vollständig aufgebaut hat, öffnet auch AV2, um den benötigten Massenstrom für den Testlauf bereitzustellen. Das Regelventil ist zu keinem Zeitpunkt vollständig dicht und es kommt immer zu einer Leckage, die über die Fackel abgeführt wird. Da eine Messblende immer nur für einen bestimmten Massenstrombereich kalibriert ist, sind diese Daten erst nach Öffnen des CV nutzbar [18].

Bei $t = 0$ wird die Brennkammer (BK) gezündet und der Versuch beginnt. Zu Anfang wird nur mit flüssigem Methan getestet bis später das gasförmige Methan dazu geschaltet wird. Dieser Vorgang beginnt mit dem Schliessen von AV3 bei $t_n = 0,08$. Danach wird mit einem Druckkriterium entschieden, von welcher Seite das Volumen nach CV bedrückt wird. Ist dieses erfüllt, öffnet AV4 bei $t_n = 0,1$. Eine Sekunde später wird CV auf Ventilposition pos_1 gesteuert.

Die Umstellung von Regelung auf Steuerung erfolgt bei $t_n = 0,13$. Hier wird der Massenstrom \dot{m}_1 als Führungsgröße eingestellt. Sollte das Kriterium nicht erfüllt worden sein, wird AV4 bei $t_n = 0,14$ geöffnet. Danach werden über das Regelventil verschiedene Betriebszustände eingestellt bis der Lauf bei $t_n = 1$ beendet wird. Insgesamt wird der Zeitraum von $t_n = -1$ bis $t_n = 1$ simuliert.

Tabelle 3.1: Ablauf des modellierten Versuchs

$t_n[-]$	Komponente	Aktion
-1,80	AV3	offen
	AV4	geschlossen
	CV	pos_1
-1,77	CV	pos_2
-1,71	CV	pos_3
-1,40	CV	pos_4
-0,94	AV1	offen
0,40	AV2	offen
0,00	BK	Zündung
0,08	AV3	geschlossen
	CV	pos_5
0,10	AV4	offen (Wenn Druckkriterium erfüllt)
0,13	CV	\dot{m}_1
0,14	AV4	offen (Auch wenn Druckkriterium nicht erfüllt)
0,28	CV	\dot{m}_2
0,43	CV	\dot{m}_3
0,58	CV	\dot{m}_4
0,73	CV	\dot{m}_5
0,90	CV	\dot{m}_6
1,05	CV	\dot{m}_7
1,20	CV	\dot{m}_8
1,70	CV	\dot{m}_9
1,88	CV	\dot{m}_{10}
2,03	CV	\dot{m}_{11}

3.3 Aufbau des Schaltbilds in EcosimPro

Im Folgenden soll das in EcosimPro erstellte Schaltbild erläutert werden. Dieses ist in Abb. 3.2 dargestellt und bildet den in Abb. 3.1 gezeigten Aufbau nach. Wie in Kap. 3.1 werden GCH4 System, Transferleitung und GH2 System einzeln vorgestellt. Die verbauten Ventile wurden in der Literatur nachgeschlagen und die Ventilfläche (A_0) bei voller Öffnung im Modell hinzugefügt. Für die Ventile vom Typ Kugelhahn wird der Druckverlust vernachlässigt, wenn der Innendurchmesser des Ventils dem der Leitung entspricht. Dies ist bei allen Handventilen der Fall, weshalb diese nicht im Modell berücksichtigt sind.

Ansonsten werden die Druckverlustbeiwerte (ζ) anfangs nach Richtwerten aus der Literatur eingestellt: 2 für Kugelhähne, 5 für Eckventile [19]. Im weiteren Verlauf werden diese Einstellungen anhand von Messwerten kalibriert.

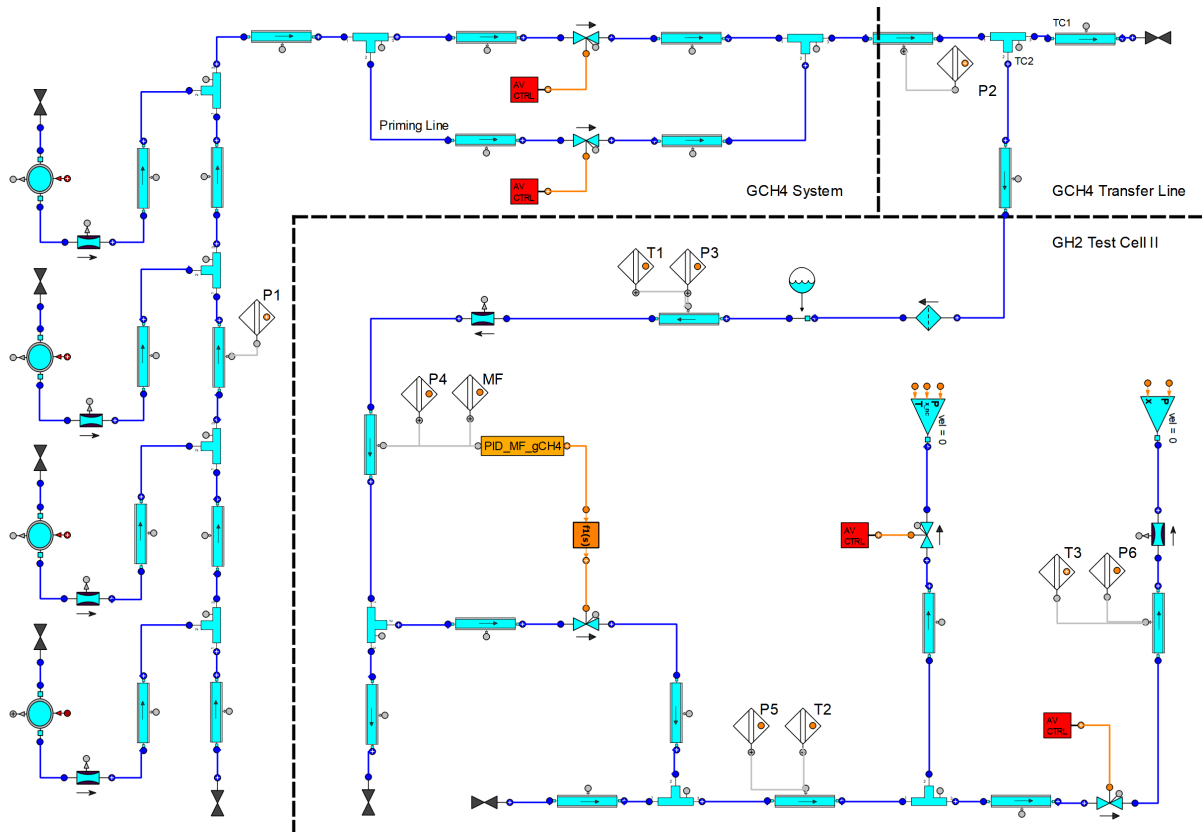


Abbildung 3.2: EcosimPro Modell des GCH4 Versorgungssystems

3.3.1 GCH4 System

Im Modell wird jedes Bündel durch ein einzelnes Volumen, mit modellierter Wand, dargestellt. Sobald der Druck und damit die Temperatur in der Flasche fällt, wird Wärme aus der Flaschenwand auf das Methan übertragen. Um hier realistische Ergebnisse des

Wärmeübergangs zu erhalten, wurde die Länge des Tanks entsprechend der Länge einer Flasche gewählt. Der benetzte Umfang wurde als die Summe der benetzten Umfänge der Flaschen gewählt, weshalb die, für den Wärmeübergang entscheidende, benetzte Fläche stimmt. Dreidimensional würde dies einem Tank mit nicht kreisförmigen Querschnitt entsprechen.

Der Druckverlust in den dünnen Leitungen an den einzelnen Flaschen wird über eine Drossel mit kalibriertem Druckverlust modelliert. P1 ist, genau wie in der Realität, zwischen den mittleren Zuführungen positioniert. Die während des Testlaufs immer geschlossenen Ventile zum Befüllen werden durch eine Dead Stop Komponente ersetzt. Aufgrund des geringen Durchmessers an dieser Stelle wird auf eine Abbildung der Verzweigung verzichtet. Die Hauptventile werden während des Versuchs geschaltet, somit werden diese als Valve Komponente eingefügt. Die Steuerung erfolgt über AV Reader. Die GCH4 Leitungen sind im Gegensatz zu den GH2 Leitungen zum größten Teil draußen positioniert. Durch Sonneneinstrahlung können hier deutlich größere Wärmeströme ins Fluid gelangen. Auf die genauere Modellierung der thermischen Randbedingungen wird im Kap. 3.6 eingegangen.

3.3.2 Transferleitung

Das erste ca. $0,5L_1$ lange Stück der Transferleitung wird durch eine einzelne Rohrkomponente modelliert. Die Querschnittsänderung an den Klammerverbindungen sind so klein, dass diese vernachlässigt werden. Nach dieser Leitung folgt die Aufteilung auf Leitungen für beide Testzellen. Da für diesen Versuch nur Testzelle 2 verwendet wird, wird das Ventil der anderen Leitung durch einen Dead Stop ersetzt. Der Rest der Transferleitung wird mit einer einzelnen Rohrkomponente modelliert. Die Klammerverbindung am Übergang wird mit einer Drossel dargestellt, da der Innendurchmesser der GCH4 und GH2 Leitungen aufgrund einer anderen Druckauslegung verschieden sind. Das Sicherheitsventil ist während aller betrachteten Läufe geschlossen und die abgeführte Leitung hat ein sehr geringes Volumen, weshalb dieser Teil nicht modelliert wurde. Kleine, tote Volumina haben wenig Einfluss auf die Lösung, können aber aufgrund der Reflektion akustischer Wellen numerische Probleme verursachen [3].

3.3.3 GH2 Fahrleitungen

Im GH2 System müssen einige Vereinfachungen getroffen werden, die bei anderen Betriebsbedingungen, zu größeren Abweichungen der Ergebnisse führen könnten. Besonders das Rohrstück mit größerem Querschnitt ist an dieser Stelle problematisch. Durch die Aufweitung über eine kurze Strecke und die Geometrie des Filters, wird es an dieser Stelle zu ausgeprägten dreidimensionalen Strömungserscheinungen kommen, die von dem folgenden, aus vielen kleinen Röhrchen bestehenden, Strömungsgleichrichter unterdrückt werden. Dieser Effekt wird noch dadurch verstärkt, dass die Strömung direkt vor dem Fil-

ter 2-mal mit kleinerem Radius umgelenkt wird, was für eine asymmetrische Anströmung des Filters sorgt. Diese makroskopischen Strömungseffekte sind im Modell nur durch konzentrierte Druckverluste oder Korrekturwerte in den Pipe Komponenten zu modellieren. Die erste Querschnittsänderung wird einfach durch unterschiedliche Rohrdurchmesser vor und nach dem Filter modelliert und der wahrscheinlich recht geringe Druckverlust des nachfolgenden Strömungsgleichrichters mit in der Filterkomponente aufgenommen. Da zwischen den Komponenten der Druck nicht gemessen wird, könnte nicht unterschieden werden, welche Komponente welchen Beitrag zum Druckverlust liefert, weshalb diese Vereinfachung keine Abweichung zum Modell mit aufgeteilten Komponenten verursacht.

Am Ende des dickeren Rohrs ist die Messblende positioniert. Da für eine korrekte Wiedergabe der Druckverlust der richtige Durchmesser vor und hinter der Blende wichtig ist, beginnt die Querschnittsreduktion auf den ursprünglichen Durchmesser von D_2 erst ein Stück hinter dieser Komponente und erstreckt sich über eine Zelle der nachfolgenden Pipe Komponente. Das Regelventil (CV) ist in einer Nebenleitung mit Durchmesser D_5 positioniert. Die parallel dazu verlaufende Hauptleitung ist unterbrochen und der gesamte Massenstrom fließt durch das Regelventil. Das überstehende Volumen der Hauptleitung wurde im Modell mit einer geringer aufgelösten Pipe Komponente berücksichtigt. Das Regelventil wurde als Valve Komponente modelliert. Da es dem realen Verhalten besser entspricht wurde zwischen Ausgang der Regelung und Eingang des Ventils ein Verzögerungsglied erster Ordnung eingefügt. Somit entspricht das Gesamtverhalten der Stellanrichtung einem nicht schwingungsfähigen PT2 Glied. Der Ventildurchmesser ist mit D_{ventil} bekannt. Hieraus wird die Fläche bei voller Öffnung errechnet und das Verhalten über die Öffnungsposition wird als linear angenommen. Die Ventilcharakteristik wird über das Verhalten von ζ über die Öffnungsposition kalibriert. Auf die Gültigkeit dieser Annahme wird in Kapitel 4 eingegangen. Die Zusammenführung hinter dem Regelventil ist auf die gleiche Weise modelliert wie die Aufteilung. Die Abzweigung zur Fackel ist erneut über eine Tee Komponente vorgesehen, an die ein Rohr und AV3 als Valve Komponente angefügt ist. Da als Randbedingung die Werte der, in der Hauptleitung positionierten, Sensoren gewählt werden, wird kein Druckabfall über das Ventil in geöffnetem Zustand angenommen und die Randbedingung direkt an diesem positioniert. In der Hauptleitung wird AV4 als Valve Komponente mit dem genannten ζ Wert für Eckventile vorgesehen. Da hier zwischen dem Ventil und dem Interface noch einmal der Druck und die Temperatur gemessen wird, ist hier eine weitere Pipe Komponente verbaut, die mit der entsprechenden Messtechnik verbunden ist. Darauf folgt abschließend die Randbedingung am Interface.

3.4 Aufbau der Massenstromregelung in EcosimPro

Nun wird der Aufbau der Regeleinrichtung für das CV erläutert. In Abb. 3.3 ist der schematische Aufbau des erstellten Blocks zu sehen. Die benutzerdefinierten Eingangswerte werden durch die vorgestellte Sequence Komponente bestimmt. Zunächst wird der Wert der Schaltung zwischen Regelung und Steuerung ausgegeben. Dieser Zahlenwert wird in einen Booleschen Wert umgewandelt, der die beiden Schalter betätigt. Ist der Switch

Tabelle 3.2: Übersicht der verwendeten Regelparameter

Parameter	Wert
Proportionalbeiwert	0,001[–]
Nachstellzeit	0,001[s]
Vorhaltezeit	0,0001[s]

Wert 1, entspricht die Schalterposition der in Abb. 3.3. Die Einrichtung arbeitet im Regelungsbetrieb. Hierbei ist die Regelgröße der vom Sensor gemessene Massenstrom. Die Führungsgröße wird vom MF Ausgang des Sequence Blocks bereitgestellt. Diese beiden Größen werden an den PID Regler übergeben. Dessen Ausgang ist mit einem Additionsblock verbunden. Diese Summe wird im Regelungsbetrieb an das Ventil ausgegeben. Ist der Wert 0 arbeitet sie im Steuerungsbetrieb. Hierbei wird der Vpos Ausgang direkt an das Ventil übergeben.

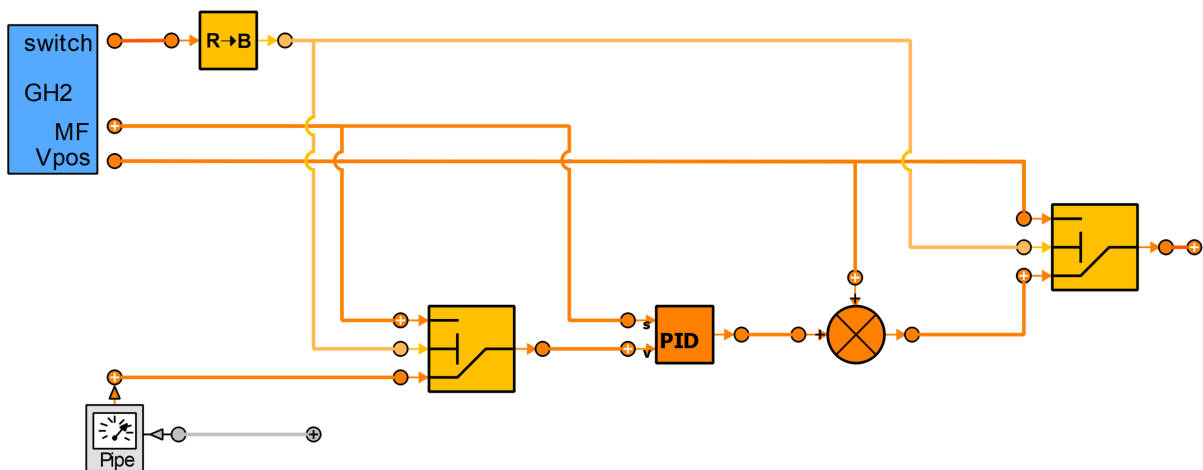


Abbildung 3.3: Verschaltung der Regeleinrichtung

Wie in Tab. 3.1 gezeigt, läuft die Regelung zunächst im Steuerungsbetrieb und wird bei $t_n = 0,13$ umgeschaltet. Um einen sauberen Übergang zu gewährleisten, sind zwei zusätzliche Maßnahmen in der Verschaltung implementiert: Um das Integrieren des PID Reglers vor dem Umschalten in den Regelungsbetrieb zu verhindern, wird mit dem linken Switch vorher der gleiche Wert an die beiden Eingänge übergeben. Damit startet der Integrierer mit dem Wert 0 beim Umschalten. Dies ermöglicht über eine Addition des Wertes der Steuerung zum Ausgang der Regelung einen glatten Übergang in den Regelungsbetrieb.

In dem simulierten Fall ist eine PI Grundstruktur für den Regler ausreichend. Um eine Regeleinrichtung zu erhalten, die ohne Änderung des mathematischen Modells flexibler ist, wurde die Struktur PID gewählt. In Tab. 3.2 sind alle Einstellungen aufgeführt. Da eine Vorhaltezeit von 0 s zu numerischen Fehlern führt, wurde diese sehr klein gewählt.

3.5 Aufbau des Workflows für den späteren Gebrauch

Nach Fertigstellung der Simulation soll diese möglichst wirtschaftlich betrieben werden. Die Bedienung der Simulation wird nicht nur vom Entwickler der Simulation ausgeführt, sondern auch von anderen Ingenieuren, die den Prüfstand vorbereiten. Vorteilhaft ist es, wenn die Simulation die Bedienung mit wenig Vorwissen über das verwendete Programm erlaubt.

Hierfür stellt EcosimPro ein Add-in für Microsoft Excel zur Verfügung. Abb. 3.4 zeigt einen Teil der Umsetzung für diese Simulation. Darin können, solange die mathematische Struktur (Partition) gleich bleibt, alle Eingangsparameter und Initialwerte der Variablen geändert werden. Dies geschieht durch Eingabemasken (Watches), in Form von Einträgen in der Excel Tabelle. In Diesen wird der aktuelle Wert angezeigt und durch einfaches Eintragen kann Dieser überschrieben werden. Ein Rücksetzen auf den ursprünglichen Wert ist immer per Knopfdruck möglich.

Sequenzen und andere Eingabedaten werden immer bei Drücken der „Reload Model“ Schaltfläche neu aufgerufen, also können auch hier Änderungen mit wenig Aufwand umgesetzt werden. Diese freie Gestaltbarkeit bietet die Möglichkeit, ein intuitives Benutzerinterface zu schaffen, das ohne Vorwissen im Umgang mit EcosimPro bedient werden kann. Neben den Eingabemasken enthält das Interface auch Grafiken, die anschaulich zeigen welchen physikalischen Effekt die Werte in den Watches haben.

Report Sheets speichern ausgewählte Ausgaben der Simulation für jeden Zeitschritt, die später für die Auswertung genutzt werden. Mittels eines Visual Basic Makros werden die Reports mit einem Knopfdruck in dem Ordner abgelegt, aus dem das später verwendete Auswerteskript in MATLAB die Daten importiert. Der Name der exportierten Datei wird auf der ersten Folie festgelegt und kann für jeden Versuch geändert werden. Für das abschließende grafische Aufbereitung muss dieser Name im Skript angegeben werden und die Auswertung läuft automatisch ab. Hierbei werden die in Kap. 4 verwendeten Auswertungen in nicht normierter Form erstellt. Neben dem Vorteil der einfachen Bedienung, ist es mit dieser Methodik auch möglich, deutlich schneller Simulationen zu erstellen. Alle für diese Arbeit erstellten Simulationen wurden auf diese Weise erstellt.

3.6 Wärmeübergang

Die Rohre und Flaschen des Versorgungssystems sind thermisch nicht isoliert, somit muss das innere, äußere und wandinterne thermische Verhalten modelliert werden. Der kritische Punkt von Methan liegt bei 45,99 *bar* und 190,56 *K*, somit liegt das Fluid in den Rohrleitungen nach dem Bedrücken in überkritischem Zustand vor. Auf Grundlage dessen wurde

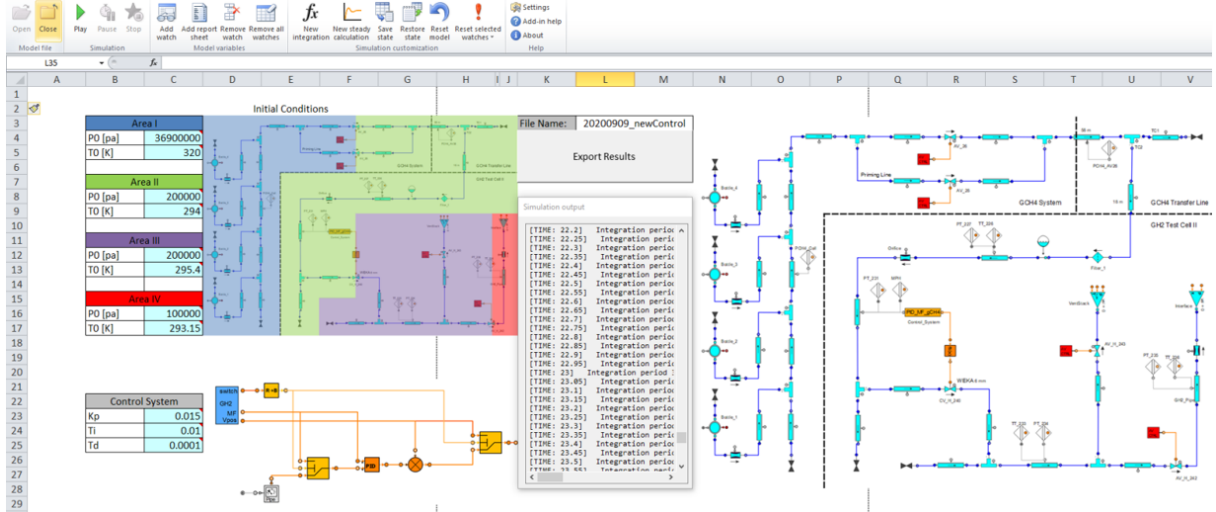


Abbildung 3.4: Excel Nutzeroberfläche

das HT-tube-1ph Modell [3] zur Modellierung des Wärmeübergang zwischen Fluid und Wand ausgewählt. Für die wandinterne Modellierung des thermischen Verhaltens werden für alle Rohre Wandstärke, Innendurchmesser und Material vorgegeben. Auf Grundlage dessen errechnet EcosimPro die Wärmeleitung und -Verteilung in radialer und axialer Richtung.

3.6.1 Wärmeübergang außen am Rohr

GCH4 System und Transferleitung

Zur Abschätzung der äußeren Wärmeübergangskoeffizienten, die im Modell explizit als konstanter Wert angegeben werden, werden verschiedene Nusseltkorrelationen verwendet. Hierbei muss zwischen freistehenden und innenliegenden Rohren unterschieden werden. Für das gesamte, außen gelegene, GCH4 System wird Gleichung 3.1 für erzwungene Konvektion an einem quer angeströmten Zylinder gewählt, diese ist eine Funktion der Reynolds- (Gl. 2.6) und Prandtlzahl (Gl. 2.8) [20]. Die Stoffwerte wurden für $T_{aussen} = 293,15\text{ K}$ ermittelt.

$$\overline{Nu}_d = c Re_d^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_0} \right)^p, \quad (3.1)$$

Mit Hilfe der Definition der Nusseltzahl (Gl. 2.7), kann nach Umstellen der Wärmeübergangskoeffizient α errechnet werden. Der letzte Term wird für die Berechnung vernachlässigt, da die Prandtlzahl im relevanten Bereich annähernd konstant ist [20]. Mit der Annahme von 5 m/s Windgeschwindigkeit ergibt sich $Re \approx 1600$. Damit werden die Koeffizienten zu $c = 0,26$, $m = 0,6$ und $n = 0,37$ bestimmt [20] und der äußere Wärmeübergangskoeffizient zu $40,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ errechnet. Da nicht alle Rohre perfekt angeströmt werden,

wird dieser Wert als oberer Richtwert für die spätere Kalibrierung verwendet. Zusätzlich kann es bei den freistehenden Rohren zu Wärmeübergang durch Sonneneinstrahlung kommen. Die Solarkonstante $E_0 = 1367 \frac{W}{m^2}$ beschreibt die gesamte Wärmeeinstrahlung der Sonne über der Atmosphäre [21]. Diese Sonneneinstrahlung wird durch die Atmosphäre abgeschwächt. Zusätzlich liegen nie alle Rohre in der Sonne. Als Emissivität für den Stahl der Rohre wird ein repräsentativer Wert von 0,6 gewählt [22]. Mit diesen Annahmen wird die eintreffende Sonneneinstrahlung zu $200 \frac{W}{m^2}$ abgeschätzt. Wie man sehen kann, ist der Beitrag durch Strahlung an einem sehr sonnigen Tag etwa in der Größenordnung der Konvektion bei $5 m/s$ und $5 K$ Temperaturdifferenz. Da die genauen Bedingungen zum Zeitpunkt des modellierten Tests nicht bekannt waren, werden diese Werte nur genutzt, um die Abschätzung des Wärmestroms zu größeren Werten hin zu erweitern. Im finalen Modell wird $25 \frac{W}{m^2 K}$ mit einer Außentemperatur von $293,15 K$ verwendet, was genau in den hier bestimmten Bereich passt.

GH2 System

Bei den innenliegenden Rohren des GH2 Systems wird Windstille und kein Wärmeeintrag durch Strahlung angenommen, weshalb die in Gl. 3.2 gezeigt Nusseltkorrelation für natürliche Konvektion verwendet wird [20].

$$\overline{Nu}_d = \left[0,6 + \frac{0,387 (GrPr)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559 \frac{9}{16}}{Pr} \right)^{\frac{8}{27}} \right]} \right]^2 \quad (3.2)$$

Da die Grashofzahl (Gl. 2.9) temperaturabhängig ist, wurde der in Abb. 3.5 gezeigte Plot erstellt. In diesem kann der Wärmeübergangskoeffizienten abhängig von der Temperatur ablesen werden. Das Errechnen des Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt aus der Nusseltzahl genauso wie im Fall mit erzwungener Konvektion. Wie erwartet fällt dieser deutlich kleiner aus. Für das Modell wird $7 \frac{W}{m^2 K}$ während der Kalibrierung bestimmt. Dieser Wert liegt etwas oberhalb des hier bestimmten Bereichs. Dies könnte darin begründet liegen, dass es sich in der Testzelle, durch die Sogwirkung während des Laufs, um eine Mischform aus natürlicher und erzwungener Konvektion handelt.

Bündel

Da das Fluid vor Beginn des Tests in den Bündeln wärmer als die Außentemperatur ist, wird angenommen, dass sich auch die Gasflaschen mit aufheizen. Sobald der Druck in den Flaschen abfällt, sinkt auch die Temperatur in diesen, was zu einem Wärmestrom aus der Flaschenwand in das Fluid führt. Dies wiederum sorgt für einen erneuten Druckanstieg, sobald kein Fluid mehr ausströmt. Um dieses Verhalten korrekt wiederzugeben, muss die Masse der Flaschen und Temperatur der Wand zu Beginn des Versuchs gut abgeschätzt

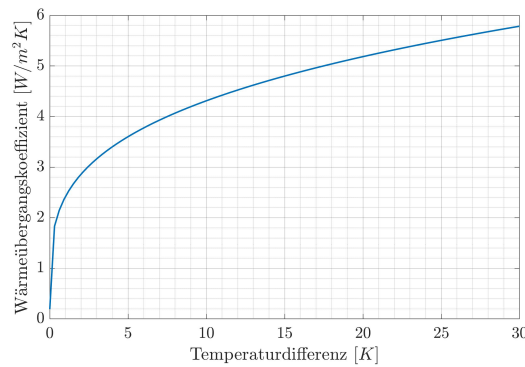


Abbildung 3.5: Wärmeübergangskoeffizient bei natürlicher Konvektion

werden. Während der Kalibrierung hat sich ergeben, dass der Wärmeaustausch der Flaschenwand mit der Umgebung zu keinen genaueren Ergebnissen führen würde, da die Masse Dieser nur indirekt bestimmt werden kann.

3.7 Initialbedingungen

Da der Versuch ab $t_n = -1$ modelliert wird, werden die verfügbaren Werte der Sensoren für den entsprechenden Abschnitt als Initialwerte gewählt. Auch an dieser Stelle wurden die Werte mit dem in Kap. 2.5 erläuterten Vorgehen normiert. Hierbei entspricht $X_{n,Y}$ dem Maximalwert der Größe X im Abschnitt Y im modellierten Zeitraum. Eine Zusammenfassung der resultierenden Werte befindet sich in Abb. 3.6.

Wie in der Grafik zu erkennen ist, steht für jeden Abschnitt ein Drucksensor zur Verfügung. In den Abschnitten 2, 3 und 4 können zusätzlich die Temperaturwerte zum Zeitpunkt $t_n = -1$ für Wand und Fluid verwendet werden. Besonders wichtig ist die Initialbedingung in den Flaschen bzw. in Abschnitt 1, weil darüber die Gesamtmasse und -enthalpie in den Bündeln bestimmt werden kann. Ohne Daten des Temperatursensors am Bündel muss diese Initialbedingung auf andere Weise abgeschätzt werden: Nach Abschluss des Primens der Transferleitung bei $t_n = -0,6$, kann die Druckdifferenz des Sensors P1 verwendet werden, um zusammen mit dem bedrückten Volumen vor und nach den Ventilen, die Starttemperatur in den Flaschen zu ermitteln.

3.8 Randbedingungen

Da die Spülvorgänge nicht modelliert werden, sind nur an 2 verschiedenen Stellen Randbedingungen für die Strömung erforderlich, am Interface zum Triebwerk und an der Leitung zur Fackel.

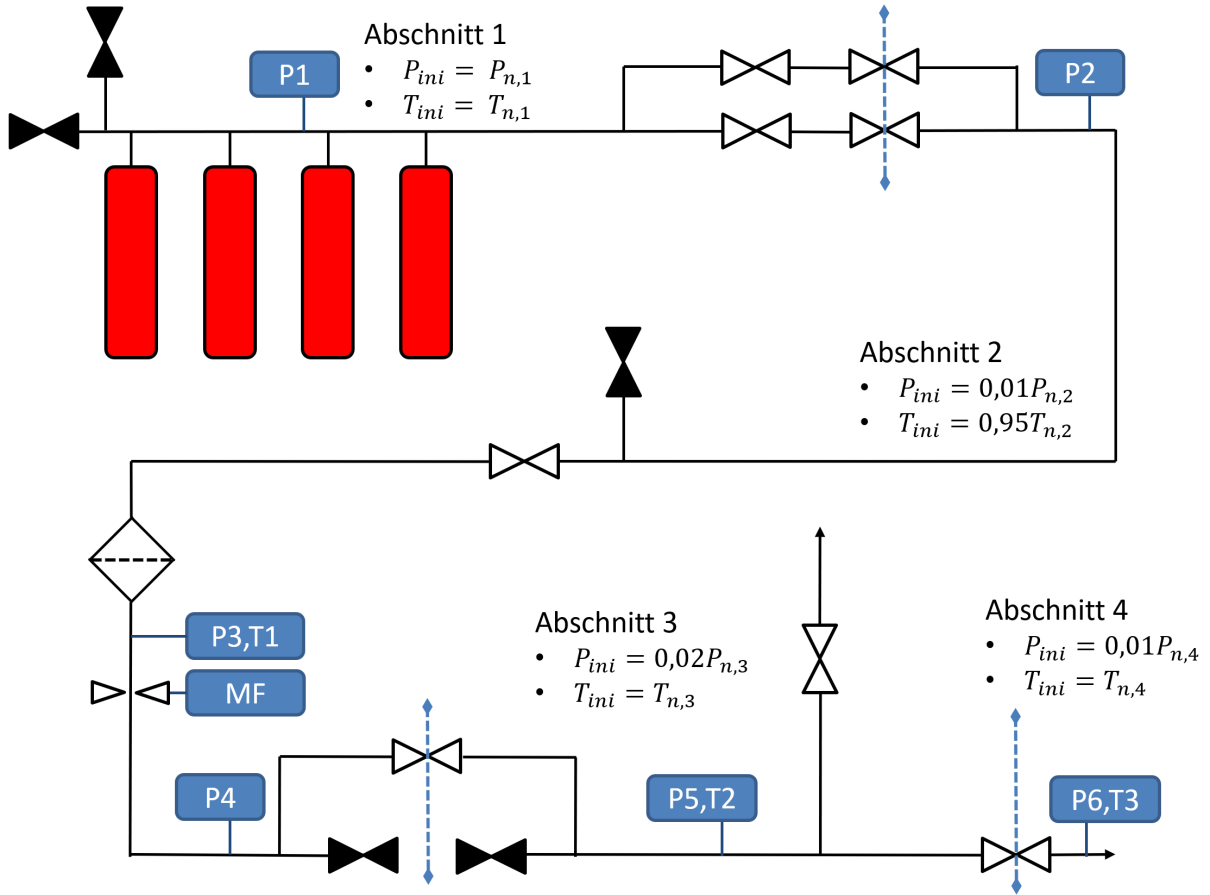


Abbildung 3.6: Initialbedingungen

3.8.1 Interface

Da die Sensoren P6 und T3 direkt am Interface positioniert sind, können diese genutzt werden, um die Randbedingungen zu ermitteln. Der Druckverlust im letzten Rohrstück zum Interface kann vernachlässigt werden, weshalb die Messwerte direkt zur Bestimmung der Randbedingungen verwendet werden. Abb. 3.7 (a) zeigt einen Vergleich der verwendeten Druckrandbedingung und der Messdaten des Sensors.

Druckrandbedingung

Der Sensor P6 ist als Hochdrucksensor mit der Abtastfrequenz f_{tast} ausgeführt. Der Sensor rauscht um etwa $\pm 1\%$. Dieses Rauschen ist, wie auf der Darstellung der Amplitude der Fourier Transformaten in Abb. 3.7 (B) zu sehen, über das gesamte Frequenzspektrum verteilt. Dieses wurde auf den Bereich von 0 bis $f_{shannon} = 0,5f_{tast}$ normiert. Die Überhöhung bei sehr kleinen Frequenzen kommt daher, dass die Daten nicht um den Mittelwert bereinigt wurden. Um die Daten sinnvoll nutzbar zu machen, muss dieses Rauschen entfernt werden.

Da in der Simulation mit einer grundlegenden Zeitschrittweite von $0,05\text{ s}$ gearbeitet wird, muss die Anzahl der Daten reduziert werden, um den Aufwand bei der Interpolation zu reduzieren. Nun wird so vorgegangen, dass erst das Messrauschen entfernt wird und danach die Abtastfrequenz der Daten gesenkt wird. Um dies zu erreichen wurde ein bewegtes quadratisches Mittel (RMS) mit einer Fensterweite von 500 Abtastungen gewählt.

Da, wie schon erwähnt, die Spülvorgänge nicht modelliert werden, werden die so verursachten Druckanstiege aus den Daten entfernt.

Nach dieser automatischen Aufbereitung müssen die Daten noch weiter manuell vorbereitet werden. Die Mittelung hat den Nachteil, dass die Druckspitzen nicht korrekt wiedergegeben werden, hierbei ist insbesondere das Verhalten beim Öffnen von AV4 betroffen. Da diese aber entscheidend für das Verhalten der Strömung sind, werden insgesamt 6 Werte nachträglich eingefügt. In Abb. 3.7 (c) ist ein Vergleich der aufbereiteten Daten mit den Rohdaten zu sehen.

Randbedingung Gasmassenanteil

Neben der Randbedingung für den Druck könnte auch noch eine thermische Randbedingung verwendet werden. Allerdings ist diese Kombination in manchen Zeitintervallen nicht stabil und verursacht unrealistische Ergebnisse. Stattdessen wird als zweite Randbedingung der Massenanteil der gasförmigen Phase verwendet. Da die Temperatur über den gesamten Zeitbereich über der kritischen Temperatur liegt, tritt zu keinem Zeitpunkt eine flüssige Phase am Interface auf. So kann mit den Kriterien $T > T_{krit}$ und $P > P_{krit}$ ermittelt werden, ob die Randbedingung überkritisch (1) oder nicht (0) angenommen werden kann. Wie in Abb. 3.7 (d) zu sehen, ist das Fluid schon vor dem Öffnen von AV4 überkritisch. An der Randbedingung wird zu diesem Zeitpunkt von Gasmassenanteil 1 auf 0 gewechselt, um Instabilitäten beim Öffnen von AV4 vorzubeugen.

3.8.2 Fackel

An der Fackel kann die Druckrandbedingung durch den Sensor P4 ermittelt werden, so lange das Ventil AV3 geöffnet ist. In den anderen Zeiträumen hat diese Randbedingung keine Relevanz für das Modell. Der Druck ist konstant bei $0,02 P_{n,3}$ und kann entsprechend als Konstante vorgegeben werden. Als zweite Randbedingung wird die Temperatur als konstanter Wert vorgegeben.

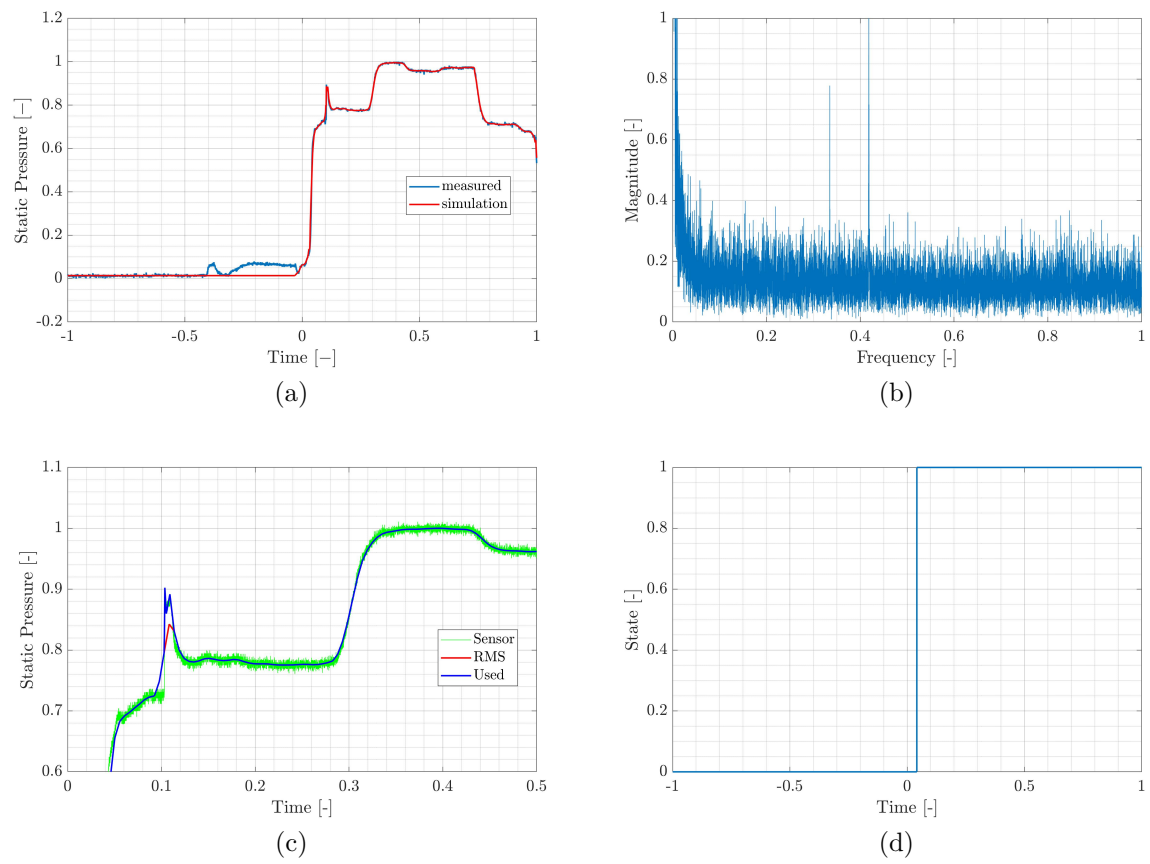


Abbildung 3.7: Druckrandbedingung P6 (a), Amplitude der Fourier Transformierten (b), Datenaufbereitung (c), Zustand am Interface (d)

4 Validierung

Im Folgenden sollen die Ergebnisse des vorgestellten Modells mit einem realen LUMEN Versuchslauf (Lauf A) verglichen werden. Vorher wurde das Modell kalibriert, um den Versuchslauf besser wiederzugeben. Wie in Abb. 3.1 zu sehen, verfügt der Prüfstand über einige Temperatur- und Drucksensoren und eine Messblende, an der aus Temperatur, Druck und Differenzdruck der Massenstrom ermittelt werden kann. Druckwerte sind an sechs verschiedenen Stellen verfügbar, Temperaturwerte an drei.

Besonderer Wert wird bei der Validierung auf eine möglichst genaue Wiedergabe der Druckmesswerte nach der Zündung bei $t_n = 0$ gelegt. Um diese Bedingungen in der Zeit während und kurz nach dem Öffnen korrekt zu modellieren, muss auch der Vorgang des Bedrückens der Leitungen und die Transienten während des Öffnens korrekt wiedergegeben werden. Für die Validierung der Temperaturen stehen weniger Sensoren zur Verfügung, da im GCH4 System und der Transferleitung während des modellierten Laufs kein Temperatursensor aktiv war. Neben den Werten für Druck und Temperatur wird auch die aktuelle Position des Regelventils aufgezeichnet. Wenn die Druckwerte P3 und P4 die Realität gut annähern, kann dies genutzt werden, um das Ventilverhalten über die Öffnungsposition zu modellieren.

4.1 P1

Wie beschrieben, ist der Sensor P1 direkt am Sammler der Flaschen angebracht. Da der Temperatursensor an ähnlicher Stelle während des Versuchs keine Daten aufgezeichnet hat, werden die Druckwerte genutzt, um sowohl die Temperatur in der Flasche, als auch den Druckverlust zwischen den Bündeln und dem Sammler zu kalibrieren. Wie der Auswertung in Abb. 4.1 (a) zu entnehmen ist, stimmen die Werte aus der Simulation und der Realität gut überein. Die Transiente des Druckabfalls während des Primens ($-0,94 < t_n < 0,6$) sieht jedoch etwas anders aus als in der Realität.

Nachdem das Bedrücken der Transferleitung abgeschlossen ist, sieht man, dass der Druck im Sammler wieder ansteigt. Wie im Kapitel Modellbildung erläutert, wird vermutet, dass der Grund hierfür der Wärmestrom aus der Flaschenwand in das Fluid ist. Dieses Verhalten wird vom Modell wiedergegeben. Dieser Effekt wird mit der Zeit schwächer und wird vom Druckabfall durch die Leckage im Regelventil überlagert, was dazu führt, dass der Druck ab $t_n = 0,25$ wieder leicht abfällt. Auch die Überlagerung dieser beiden Effekte wird vom Modell wiedergegeben, allerdings mit etwas zu geringem Druckabfall gegen Ende. Ab $t_n = 0,1$ ist das Ventil zum Interface geöffnet und der Versuch beginnt. Dies

macht sich in einem Druckabfall bemerkbar, der in Modell und Realität in ähnlicher Weise zu beobachten ist. Deutlich sichtbar ist die stärkere Druckänderung in der Simulation, wenn die Führungsgröße der Regelung geändert wird.

4.2 P2

Der Sensor P2 dient im Zeitraum $-0,94 < t_n < -0,4$ dazu, den Druckverlust in der Priming Leitung abzuschätzen. Abb. 4.1 (b) zeigt die Validierung dieses Sensors. Dabei ist zu sehen, dass auch hier, an Start und Endpunkt der Bedrückung, Zeitpunkt und Druckwert mit geringen Abweichungen wiedergegeben werden. Dabei weist die Transiente in der Simulation näherungsweise lineares Verhalten auf während der Verlauf in den Messdaten leicht konvex ist. Dies liegt möglicherweise an dreidimensionalen Strömungseffekten, die in den Rohrleitungen auftreten und mit den Vereinfachungen eines eindimensionalen Modells nicht genau genug wiedergegeben werden können. Ein anderer möglicher Grund wäre eine nicht ganz korrekte Wiedergabe der Ventilöffnung. Für den Zweck der Simulation ist dieses Verhalten weniger wichtig, weshalb an dieser Stelle auf eine genauere Betrachtung verzichtet wird.

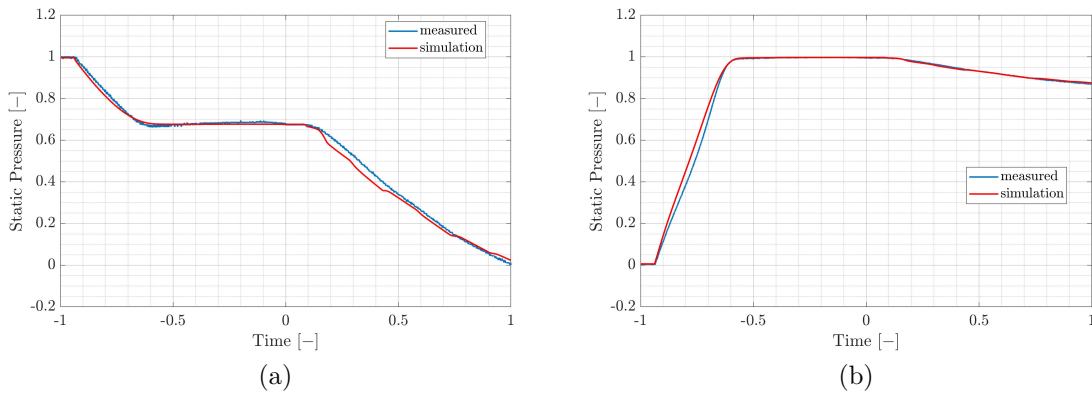


Abbildung 4.1: Drucksensoren P1 (a), P2 (b)

4.3 P3

Die Strecke zwischen P2 und P3 umfasst die gesamte Transferleitung und das erste Stück des GH2 Systems mit dem Filter. Wie in Abb. 4.2 (a) zu sehen, stimmen die simulierten Druckdaten von P2 ähnlich gut, wie die von P1 überein. Hierbei zeigen sich die schon in Abb. 4.1 (b) beobachteten Abweichungen im transienten Druckanstieg beim Primen, während die Start- und Endwerte gut übereinstimmen. In den nicht normierten Daten der Drücke P2 und P3 ist zu sehen, dass der Druckverlust über die Transferleitung und den Filter gering ist.

4.4 T1

Neben P3 ist der Temperatursensor T1 positioniert. Der Vergleich der gemessenen und simulierten Werte an T1 wird in Abb. 4.2 (c) gezeigt. Zu Beginn ist zu erkennen, dass der Initialwert korrekt gewählt wurde. Nach dem Öffnen von AV1 steigt die simulierte Temperatur innerhalb einer sehr kurzen Zeit auf einen hohen Wert. Dieses Verhalten ist in den Messdaten nicht zu beobachten. Bei Betrachten der Detailansichten des Drucks P3 in Abb. 4.2 (b) und der Temperatur T1 in Abb. 4.2 (d) ist zu erkennen, dass die Temperatur schon gestiegen ist, wenn der Druckanstieg noch minimal ist. Daher kann dieser Anstieg nicht nur über adiabate Kompression erklärt werden. Da der Anstieg der Temperatur gleichzeitig mit dem ersten Druckanstieg stattfindet, wird vermutet, dass es an dieser Stelle zu einer Abhängigkeit der Temperatur gegenüber der zweiten oder höheren Ableitung des Drucks kommt. Dieses Verhalten könnte auf ein numerisches Problem schließen lassen. Dort steigt die Temperatur eher linear bis der Hochpunkt bei $t_n = -0,6$ erreicht wird. Danach bleiben die Temperaturen näherungsweise parallel, um die anfängliche Abweichung verschoben. Sobald AV4 öffnet beginnen sich die Temperaturen anzunähern, bis nach einiger Zeit das Verhalten mit geringen Abweichungen wiedergeben werden kann.

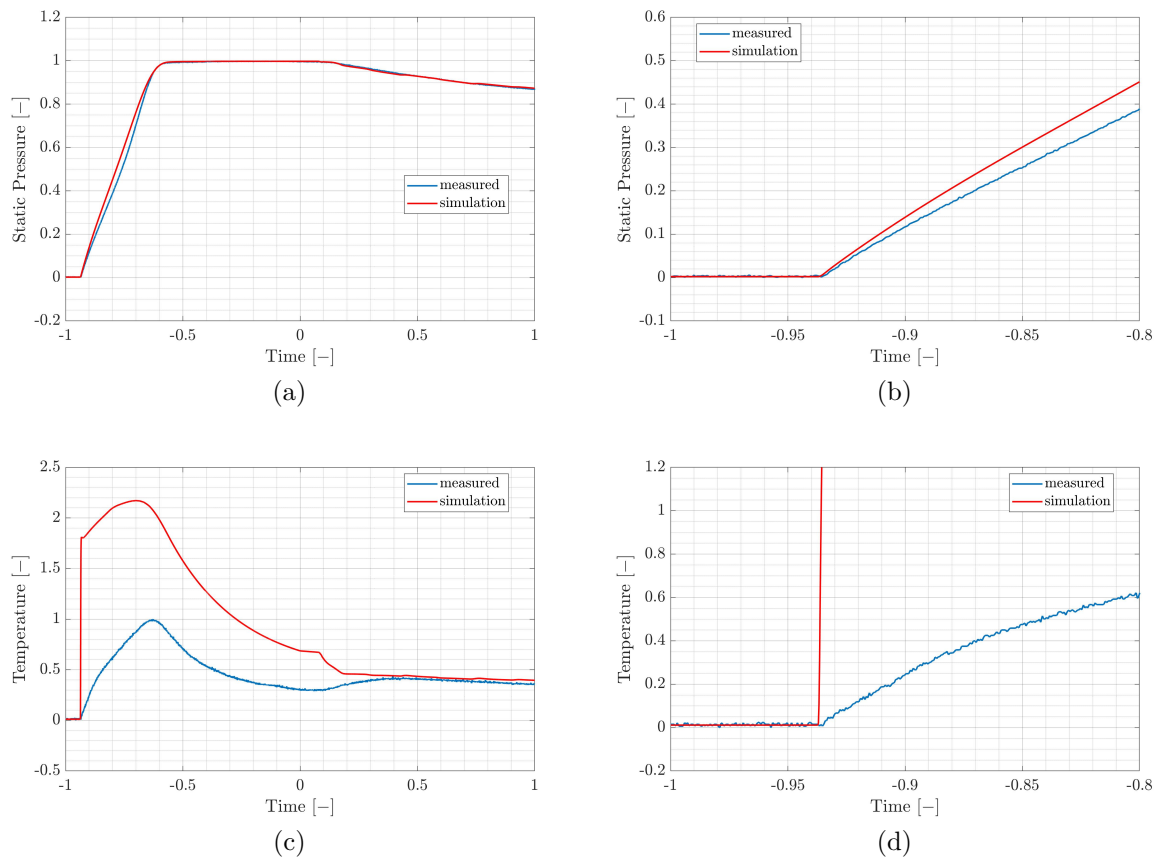


Abbildung 4.2: P3 (a), P3 Detailansicht (b), T1 (c), T1 Detailansicht (d)

4.5 P4

Der Sensor P4 wird von P3 nur durch die Messblende und eine kurze Rohrleitung getrennt. Die Validierung von P4 wird in Abb. 4.3 gezeigt. Der durch die Blende verursachte Druckverlust ist relativ gering, weshalb auch der Einfluss auf das Gesamtverhalten des Modells gering ausfällt. Allerdings ist dies ein Bauteil, das für verschiedene Läufe getauscht wird. Dementsprechend ist es für die Übertragbarkeit wichtig, dass dieses Verhalten ab $t_n = 0,1$ richtig wiedergegeben wird. Die Abweichung der Druckwerte zur Realität von P2 sind den bei P3 beobachteten sehr ähnlich. Die vorher benannten Abweichungen im Transientverhalten beim Primen und bei Änderung der Führungsgröße sind auch hier zu beobachten.

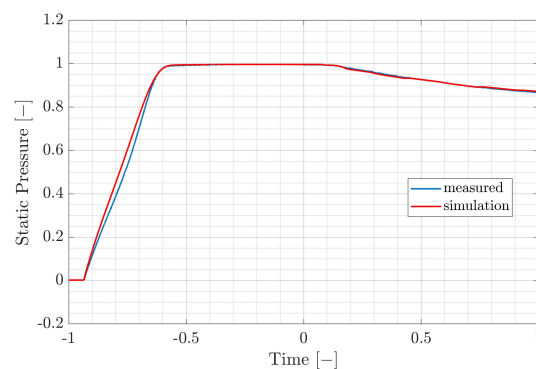


Abbildung 4.3: Validierung P4

4.6 P5

Nach dem Regelventil ist der Sensor P5 positioniert. Der Vergleich zu den Messdaten ist in Abb. 4.4 (a) zu sehen. Im Zeitraum bis $t_n = 0,1$ wird der Druck an dieser Stelle vor allem durch die nahe gelegene Randbedingung der Fackel bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt schließt dieses Ventil und das Fahrventil zum Interface wird geöffnet. Nun wird der Druck zum größten Teil von dieser Randbedingung bestimmt. Da die simulierten Werte an P4 gut mit der Realität übereinstimmen, kann die große Druckdifferenz zwischen P4 und P5 im Zeitraum ab $t_n = 0,1$ genutzt werden, um das Verhalten des Regelventils zu kalibrieren. Es lässt sich erkennen, dass dieser Druckverlust im stationären, wie auch im transienten Verhalten gut vom Modell wiedergegeben wird. Nur bei Änderung des, als Führungsgröße vorgegebenen, Massenstroms sind Abweichungen zu erkennen. Die weiteren Eigenschaften des Regelventils werden in Abschnitt 4.10 erläutert, in dem die Ventilstellung und der Massenstrom betrachtet werden. Für eine erfolgreiche Modellierung des Ventilverhaltens ist es erforderlich, dass alle drei Werte gut wiedergegeben werden können.

4.7 T2

Der Vergleich von T2 wird in Abb. 4.4 (b) gezeigt. Während des Primens der Leitungen ab $t_n = -0,94$ beginnt hier die Temperatur zu sinken. Der Grund hierfür ist in der Leckage im CV zu suchen. Dort wird das Methan entspannt und die Temperatur sinkt, was vom Modell wiedergegeben werden kann. Bei $t_n \approx -0,1$ kommt es in den realen Daten zu einem Knick im Temperaturverlauf. Der Grund hierfür ist noch nicht bekannt. Vermutlich ändert sich zu diesem Zeitpunkt die Ventilposition, was zu einem weiteren Temperaturabfall führt. Ähnlich wie in Kap. 4.4 ist somit die Temperatur vor Öffnen von AV4 zu hoch. Dementsprechend ist die Abweichung in den nächsten Sekunden noch zu sehen und ab $t_n = 0,3$ haben sich Simulation und Realität mit geringen Abweichungen angenähert. Der Rest des Verlaufs wird mit einer geringen Abweichung wiedergegeben.

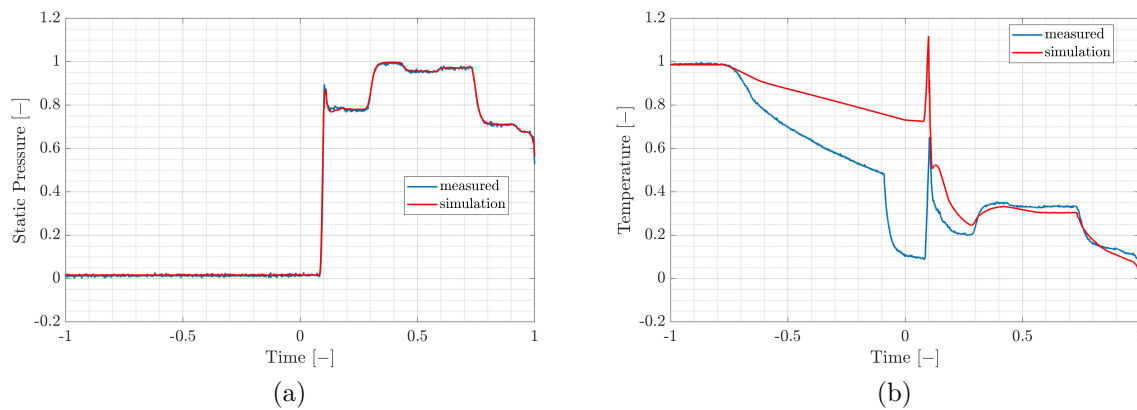


Abbildung 4.4: P5 (a), T2 (b)

4.8 P6

Wie in Kapitel 3.8 erläutert, wird der Sensor P6 zur Bestimmung der Druckrandbedingung am Interface genutzt. Durch das nachträgliche händische Einfügen der wichtigsten Druckspitzen wird der Druck am nur wenige Zentimeter entfernt positionierten Sensor sehr gut wiedergegeben, was eine Grundvoraussetzung für die Validität des Modells ist. Der Vergleich mit den realen Daten wird in Abb. 4.5 (a) gezeigt. Der Druckverlust zwischen P5 und P6 wird vor allem dazu genutzt, die Transiente beim Öffnen von AV4 zu validieren. Diese hat viel Einfluss auf die Bedingungen am Interface und muss deshalb unbedingt korrekt wiedergegeben werden. Wie sich erkennen lässt, kommt es kurz nach $t_n = 0,1$ zu einer kleinen Abweichung im Druckverlust. Vermutlich kommen diese Abweichungen von den ungenau wiedergegebenen Temperaturwerten T1 und T2 vor Öffnen des Ventils. Ansonsten stimmen die Ergebnisse auch im Transienten sehr gut mit der Realität überein.

4.9 T3

Ähnlich wie die Auswertung zu T1 zeigt auch die in Abb. 4.5 (b) gezeigte Auswertung des Sensors T3 ein sprunghaftes Verhalten der Temperatur bei kleiner Druckänderung. Abgesehen von diesen Ungenauigkeiten bei der Wiedergabe des Transientverhaltens im Zeitraum $-0,06 < t_n < 0,13$ wird das Verhalten korrekt wiedergegeben. Die Temperaturänderungen aufgrund des Spülvorgangs bei $t_n = -0,4$ sind, aufgrund der Vernachlässigung, nicht in den simulierten Daten zu finden.

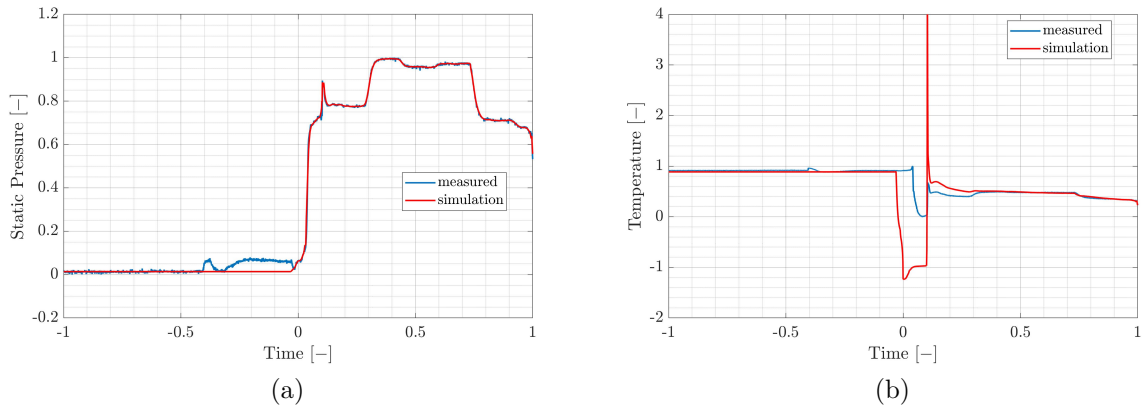


Abbildung 4.5: P6 (a), T3 (b)

4.10 Massenstrom und Regelung

Nun wird in Abb. 4.6 das Verhalten des Regelventils und des Massenstroms mit den gemessenen Daten verglichen. Durch den großen integrierenden Anteil (Nachstellzeit 0,001 s) in der Regelung, bei recht geringen Störgrößeneinflüssen in der Simulation, kann angenommen werden, dass die Regelabweichungen nach einiger Zeit gegen Null laufen. Daher kann in jedem, neu eingestellten, Betriebspunkt das Verhalten nach einigen Sekunden genutzt werden, um die Ventilcharakteristik zu kalibrieren. Der Vergleich zeigt, dass die leichten Abweichungen daher kommen, dass das Ventil nur über $\zeta = f(pos)$ kalibriert wurde, und $A = f(pos)$ als linear angenommen wurde. Einerseits wurde diese Entscheidung getroffen, weil es keine genauen Daten zu diesem Ventil gab und ähnliche Ventile einen nur leicht konkaven oder konvexen Verlauf von $A = f(pos)$ zeigen. Andererseits ist so die Einstellung der Kurve einfacher und schneller möglich. Sollten für einen Prüfstandlauf entsprechende Daten des verwendeten Ventils vorliegen, können hier die Ergebnisse noch genauer gestaltet werden.

In den Bereichen nach Änderungen der Führungsgröße kann nun das Verhalten der Regelung validiert werden: Wie man sehen kann, ist das Modell trotz konservativ gewähltem Proportionalfaktor immer noch schneller als das reale Ventil. Dies kann einerseits dadurch

erklärt werden, dass die realen Regelparameter noch kleiner gewählt werden müssen, andererseits weicht wahrscheinlich die realen Stelleinrichtung vom PT2 Verhalten in der Simulation an einigen Stellen ab. Die gewählte Verschaltung zum Verhindern von Abweichungen beim Umschalten in den Regelungsbetrieb bei $t_n = 0,13$ scheint wie geplant zu funktionieren, mit leichten Abweichungen im Transientverhalten.

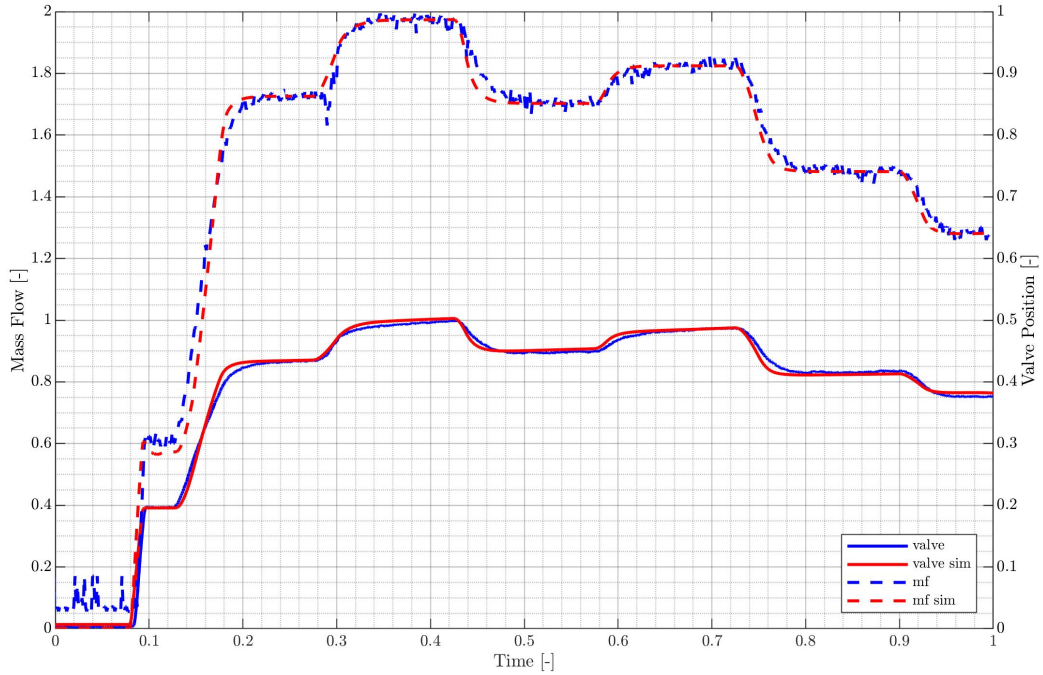


Abbildung 4.6: Validierung der Ventilposition und des Massenstroms

4.11 Druckverlust

Nach den direkten Vergleichen der simulierten Werte mit den Messwerten folgt nun eine Betrachtung daraus errechneter Größen. Mit dem Vergleich des Druckverlusts in Abb. 4.7 (a). Hierzu wird der Gesamtdruck p_{total} [17] an beiden Messstellen berechnet und dann subtrahiert (Gl. 4.1).

$$p_{total} = p_{statisch} + \frac{\rho}{2} u^2 \quad (4.1)$$

Alle benötigten Größen werden am Eingang aus P/T1 und am Ausgang aus P5/T2 bestimmt. Hierbei ist $p_{statisch}$ der statische Druck und u die Strömungsgeschwindigkeit. Zusätzlich wird der gemessene Massenstrom zur Bestimmung des dynamischen Drucks an Ein- und Ausgang genutzt. Anhand dieser Daten und den bekannten Innendurchmessern können alle benötigten Zustandsgrößen bestimmt werden.

Wie zu erkennen, kann somit nur für jeden Messwert der stationäre Druckverlust errechnet werden. Diese Annahme wird für die simulierten, wie auch die realen Daten getroffen, womit der Vergleich zulässig ist. Des weiteren ist der Einfluss des dynamischen Drucks gering. Dies ist daran zu erkennen, dass vor Öffnen von AV4 der Massenstrom noch nicht im kalibrierten Bereich ist und die Messblende somit ungenaue Ergebnisse liefert. Dennoch stimmen die beiden Werte gut überein. Wie in dem Vergleich zu erkennen, werden die Messdaten ähnlich gut wiedergegeben wie die einzelnen Druckdaten. Abweichungen treten an den schon bekannten Stellen auf.

4.12 Wärmestrom

Wie bei dem Druckverlust wird nun der Wärmestrom \dot{Q} errechnet (Gl. 4.2). Die Bilanzgrenzen sind wie vorher von P3/T1 bis P5/T2 gewählt und die gleichen Daten werden verwendet. Dieses mal werden sie genutzt um eine stationäre Energiebilanz nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik [23] aufzustellen. Hierbei ist \dot{m} der Massenstrom und h die spezifische Enthalpie.

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_{aus} - h_{ein} + \frac{1}{2}u_{aus}^2 - \frac{1}{2}u_{ein}^2) \quad (4.2)$$

Abb. 4.7 (b) zeigt diese Auswertung. In diesem Fall sind die oben genannten Probleme durch den falsch wiedergegebenen dynamischen Anteil nicht zu vernachlässigen. Im Zeitraum $t_n > 0,1$ bestätigt sich die Annahme, dass die Thermik im System bei größeren Massenströmen gut wiedergegeben werden kann. Zu Abweichungen kommt es im Zeitraum $0,1 < t_n < 0,4$ nach Öffnen von AV4.

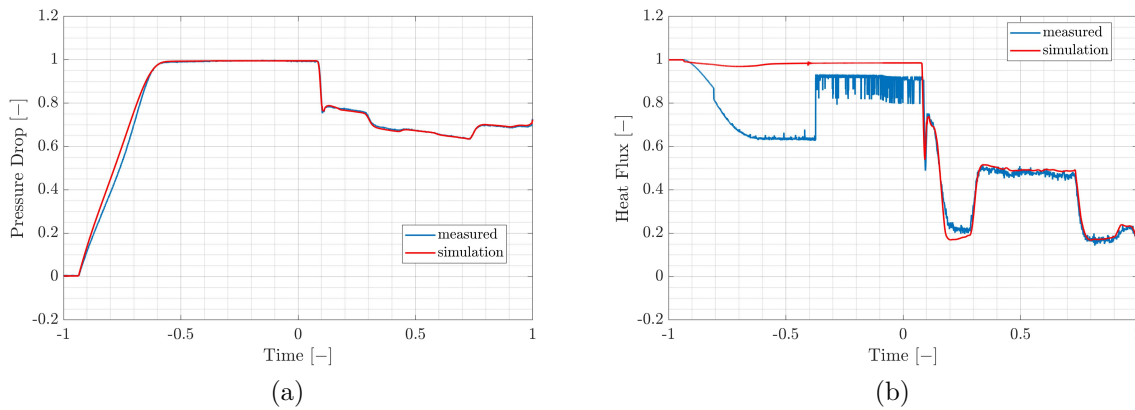


Abbildung 4.7: Druckverlust (a), Wärmestrom (b)

4.13 Test der Übertragbarkeit

Um mit der Simulation sinnvolle Aussagen über zukünftige Läufe zu ermöglichen, soll nach dem Kalibrieren der Simulationsparameter bei einem Lauf nun die Übertragbarkeit auf Läufe mit anderen Initial- und Randbedingungen gezeigt werden. Hierzu werden Lauf 6 und Lauf 8 der gleichen Testkampagne verwendet. In Tab. 4.1 werden die Unterschiede aufgezeigt.

Der Druck am Interface ist für alle drei Testläufe sehr ähnlich, wobei das Druckniveau bei Lauf C über den größten Zeitraum etwas höher liegt. Dennoch werden die Druckrandbedingungen für jeden Lauf aus den Sensordaten P6 neu ermittelt. Hierfür wird die in 3.8 vorgestellte Methodik genutzt. Der Gegendruck der Fackel ist für alle Läufe etwas über dem Umgebungsdruck. Die beiden Läufe sind ebenfalls vorzeitig abgebrochen: Lauf B bei $t_n = 0,4$ und Lauf C bei $t_n = 0,9$. Da in einem Verlauf eine Vielzahl verschiedener Massenströme eingestellt werden, kann so das Druckverlustverhalten für einen sehr großen Arbeitsbereich auf Übertragbarkeit getestet werden. Die Auswertung erfolgt anhand der Drucksensoren P1, P3, P5 und P6 und der Temperatursensoren T1 und T2. Des weiteren wird die vorher verwendete Auswertung des Regelventils genutzt.

Tabelle 4.1: Initialbedingungen der modellierten Läufe

Wert	Bereich	Lauf A	Lauf B	Lauf C
$P_{ini}[-]$	<i>I</i>	$P_{n,1}$	$0,9P_{n,1}$	$1,1P_{n,1}$
	<i>II</i>	$0,01P_{n,2}$	$0,01P_{n,2}$	$0,01P_{n,2}$
	<i>III</i>	$0,02P_{n,3}$	$0,02P_{n,3}$	$0,02P_{n,3}$
	<i>IV</i>	$0,01P_{n,4}$	$0,01P_{n,4}$	$0,01P_{n,4}$
$T_{ini}[-]$	<i>I</i>	$T_{n,1}$	$T_{n,1}$	$T_{n,1}$
	<i>II</i>	$0,95T_{n,2}$	$0,96T_{n,2}$	$0,95T_{n,2}$
	<i>III</i>	$T_{n,3}$	$1,02T_{n,3}$	$1,01T_{n,3}$
	<i>IV</i>	$T_{n,4}$	$1,03T_{n,4}$	$1,01T_{n,4}$

4.13.1 Lauf B

Drucksensoren

Der Vergleich der Drucksensoren in Abb. 4.8 zeigt, dass das Verhalten dieses Laufs ähnlich gut wiedergegeben werden kann, wie für den kalibrierten Lauf A. Die Abweichungen im Transientverhalten bei Bedrücken ist ähnlich der in 4.1 (b). Zu größere Abweichungen kommt es bei den Drucksensoren, die vor dem Regelventil positioniert sind während

des Versuchslaufs ab $t_n = 0,1$. Vergleichen mit 4.3 ist zu erkennen, dass der Druck nun geringfügig unterschätzt wird.

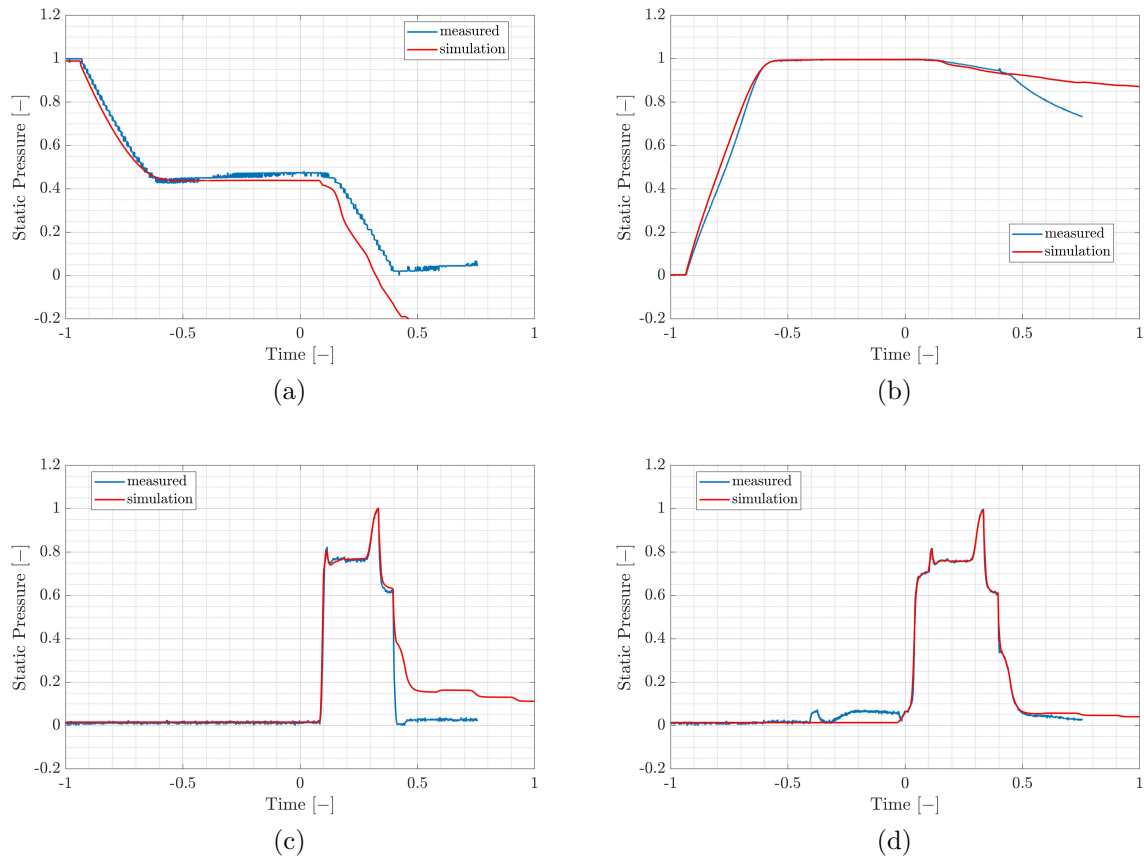


Abbildung 4.8: Lauf B: Drucksensoren P1 (a), P3 (b), P5 (c), P6 (d)

Temperatursensoren

Das Gleiche trifft auf die in Abb. 4.9 gezeigten Temperaturverläufe zu. Auch lässt sich in der Auswertung des Sensors T2 ein anderes Verhalten der realen Temperatur erkennen. Hierbei kommt es zu keinem Knickpunkt wie bei Lauf A. Wie in Kap. 4.7 erläutert ist hierfür kein Grund bekannt und weitere Untersuchungen werden durchgeführt werden müssen. Bei Betrachtung von T1 lässt sich erkennen, dass der Versuch abgebrochen wird, bevor sich die Werte aus Realität und Simulation angenähert haben. Somit kann hier weniger genau abgeschätzt werden, wie gut das Verhalten wiedergegeben werden kann.

Regelventil

Abb. 4.10 zeigt das Verhalten des Regelventils und des Massenstroms. Zu erkennen ist, dass das Ventilverhalten im unteren Bereich nicht ausreichend kalibriert werden konnte, da in Lauf A die dafür benötigten Daten nicht enthalten sind. Dementsprechend weicht

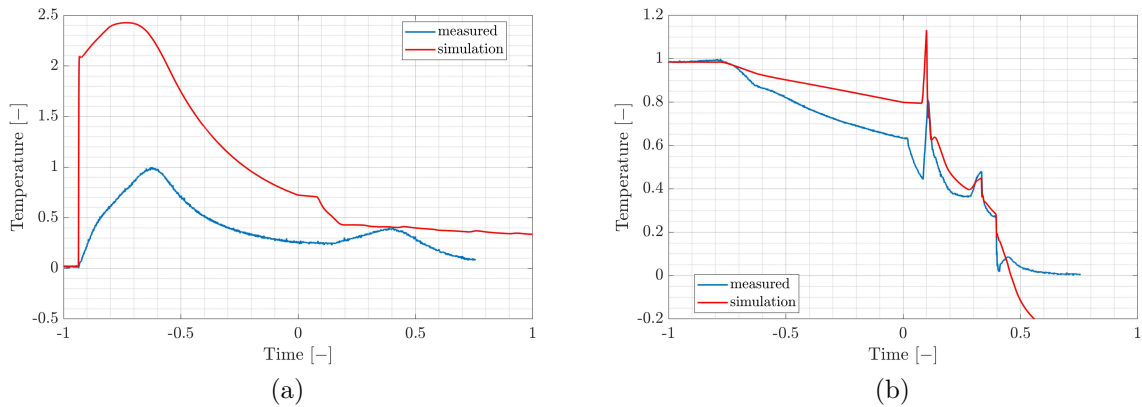


Abbildung 4.9: Lauf B: Temperatursensoren T1 (a), T2 (b)

der Massenstrom bei der zunächst auf pos_5 gesteuerten Ventilposition von der Realität ab. Sobald das Ventil weiter geöffnet ist, ist die Wiedergabe ähnlich gut wie bei Lauf A. In den Sekunden vor dem Abbruch bei $t_n = 0,4$ lässt sich erkennen, dass die eingestellte Ventilposition abweicht, obwohl der Massenstrom weiterhin übereinstimmt. Dies könnte in einer leicht abweichenden Wiedergabe der Drucktransienten in Sensor P5 in diesem Zeitraum begründet liegen.

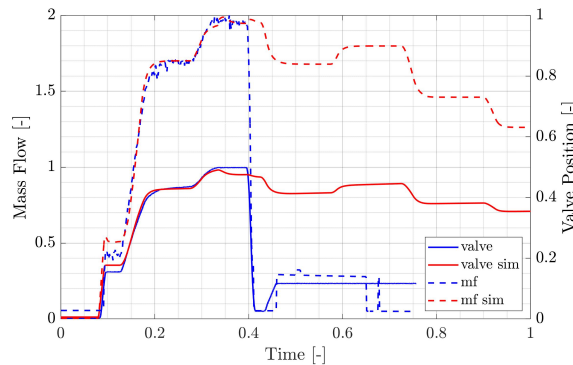


Abbildung 4.10: Lauf B: Massenstromregelung

4.13.2 Lauf C

Drucksensoren

Die in Abb. 4.11 gezeigten Druckwerte für Lauf C werden ähnlich gut wiedergegeben wie die für Lauf B. In den Messdaten des Sensors P4 ist eine Druckänderung bei Öffnung von AV2 zu sehen, die es bei den anderen Läufen nicht gibt. Zusätzlich wird der Druck nach Abschließen des Primens leicht unterschätzt. Diese Beobachtungen zusammen mit der Tatsache, dass die Temperaturabweichung in Abb. 4.12 (b) nach dem Primen deutlich größer ist als in den anderen Läufen, lässt darauf schließen, dass in Lauf 8 die Leckage größer ausfällt. Um dies zu korrigieren müsste die vorgegebene Ventilposition der Leckage

neu kalibriert werden. Anders als bei Lauf B sieht hier die Wiedergabe des Drucks ab $t_n = 0,1$ der Sensoren P1 und P4 besser aus. Weitere Unsicherheiten in der Modellierung der beiden neuen Läufe kommen dazu, da die Flaschentemperatur vor Beginn des Laufs nicht gemessen wurde und hier keine neue Kalibrierung durchgeführt wurde. Darin könnte die weiteren Abweichen im Transientverhalten begründet liegen.

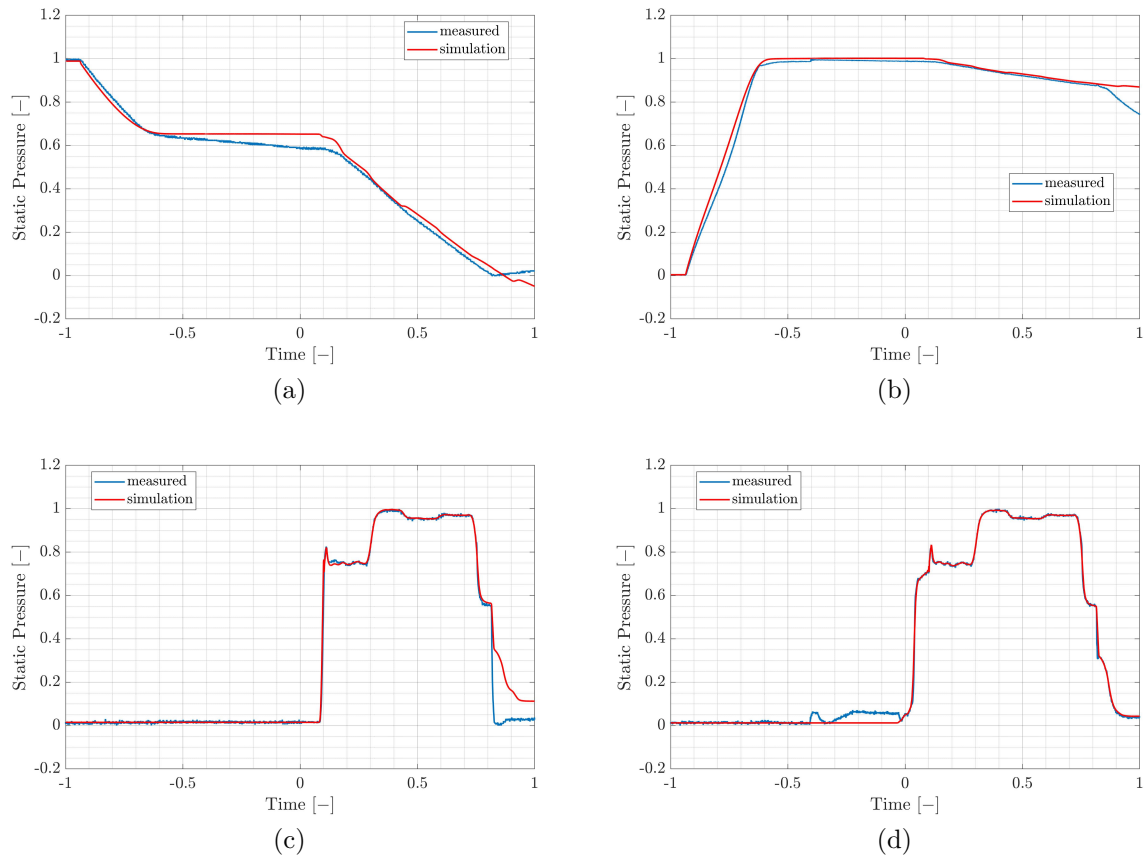


Abbildung 4.11: Lauf C: Drucksensoren P1 (a), P3 (b), P5 (c), P6 (d)

Temperatursensoren

Der Vergleich der Temperatursensoren für Lauf C wird in Abb. 4.12 dargestellt. Ab $t \approx 100$ s ist der Temperaturabfall beider gezeigten Messstellen größer als bei den anderen Läufen. Der vermutete Grund für dieses Verhalten und der Einfluss auf die Drücke im System wurde im vorherigen Abschnitt erläutert. Sobald AV4 geöffnet ist, nähern sich auch hier die Werte wieder an und nach einigen Sekunden wird das Temperaturverhalten ähnlich gut wiedergegeben wie in Lauf A.

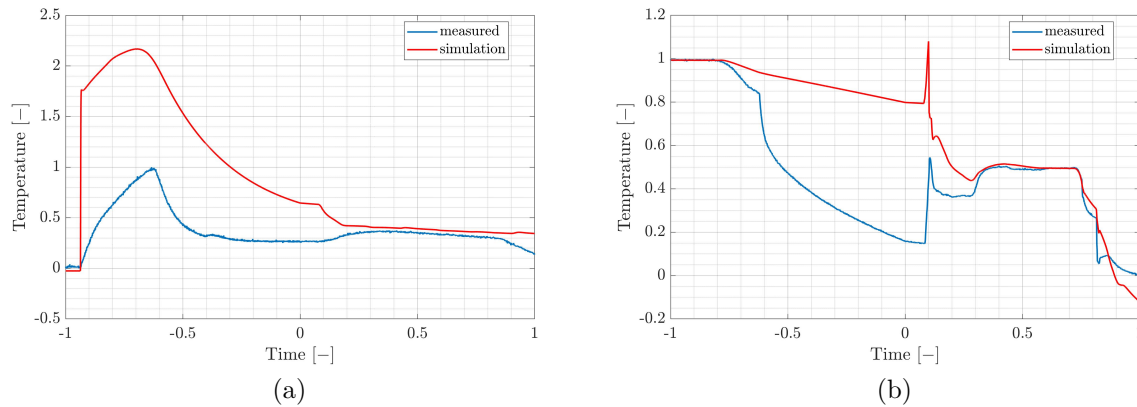


Abbildung 4.12: Lauf C: Temperatursensoren T1 (a), T2 (b)

Regelventil

Abb. 4.13 zeigt Massenstrom und Verhalten des Regelventils für Lauf C. Genauso wie in 4.13.1 lässt sich erkennen, dass das Ventilverhalten bei geringer Öffnungsposition weiterführend kalibriert werden könnte. In diesem Lauf kommt es in den realen Daten zu einer Schwingung des Massenstroms nach Umstellung in den Regelungsbetrieb. Diese Abweichung kann nicht mit Schwankungen im Druck erklärt werden, da sich dieser genauso wie in Lauf A verhält. Dementsprechend wird diese Schwankung nicht vom Simulationsmodell wiedergegeben.

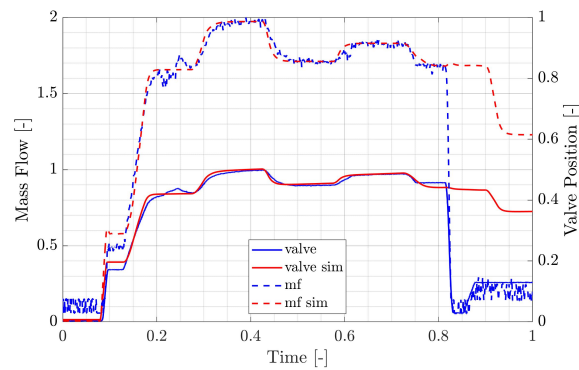


Abbildung 4.13: Lauf C: Massenstromregelung

4.14 Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Analyse bei unterschiedlichen Drücken am Interface vorgestellt. Hierzu wurde die Druckrandbedingung am Interface während Lauf A auf die Werte 50 %, 90 %, 110 %, 150 % und 200 % skaliert. Dies ist in Abb. 4.14 (b) dargestellt.

Um die Öffnungsposition des Regelventils in einer vergleichbaren Position zu halten und

Fehler durch vollständiges Öffnen zu vermeiden, wurde die Venilfläche A_0 linear mit dem Druck skaliert. Diese Tatsache ist auch wichtig, da der Proportionalbeiwert des PID Reglers auf den Stellbereich eingestellt wurde. Somit würde es beispielsweise bei gleichen Drücke und Massenströmen bei einer Regelung mit größerer Ventilfläche zu einem kleineren Stellbereich kommen. Somit würde die relative Verstärkung der Regelung steigen, was im Extremfall zur Instabilität der, vorher stabilen, Regelung führen würde.

Wie in Abb. 4.14 zu erkennen ist für alle Läufe der Einfluss des eingestellten Drucks am Interface auf das System gering. Das liegt vermutlich daran, dass das Regelventil schnell genug reagiert und den Druckverlust immer entsprechend einstellt. Da auch der verwendete Massenstrom der Gleiche ist, sollten folglich bei perfekter Regelung immer die gleichen Bedingungen vor dem CV herrschen und das Verhalten des Prüfstands stromauf dieses Ventils immer gleich bleiben.

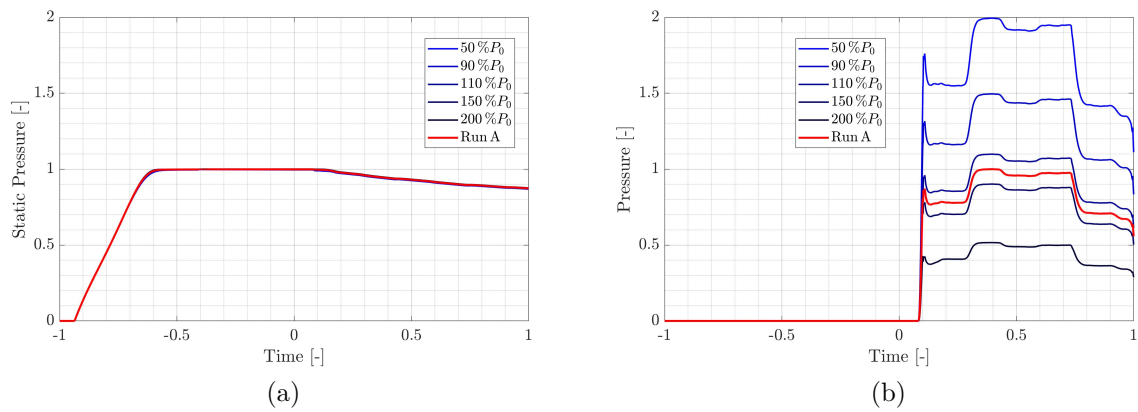


Abbildung 4.14: Drucksensoren P3 (a), P5 (b)

5 Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, das Verhalten des GCH4 Systems des P8 möglichst genau abzubilden, um bei zukünftigen Versuchsläufen eine Zeit- und Kosteneinsparung zu erreichen und den Abbruch von Versuchsläufen zu verhindern. In vorherigen Arbeiten wurden hierfür schon Modelle der LCH4 und LOX Versorgungssysteme, sowie des Triebwerks erstellt, die in Zukunft mit dem Ergebnis dieser Arbeit zusammengeschlossen werden sollen. Zunächst wurde ein Schaltbild des relevanten Teils des Prüfstands erstellt, das anhand der Anforderungen einer 1-D CFD Simulation vereinfacht wurde. Daraufhin wurde das Ergebnis in EcosimPro mit Nutzung der ESPSS Bibliotheken modelliert. Die realen Messdaten wurden genutzt, um Randbedingungen für Druck, Temperatur und Gasmassenanteil, sowie die Initialbedingungen in den Rohren und Flaschen zu bestimmen. Thermische Randbedingungen wurden anhand von Nusseltkorrelationen abgeschätzt. Neben dem Modell des Prüfstands wurde auch ein Modell der Regelung aufgebaut, die besonders das Umschalten zwischen Steuerungs- und Regelungsbetrieb möglichst genau wiedergeben soll. An diesen Simulationen wurde zunächst die Gültigkeit verschiedener Vereinfachungen evaluiert und die Parameter anhand der Messdaten kalibriert.

Nach Aufbau des Modells erfolgte zunächst ein Vergleich von Druck, Temperatur, Massenstrom und der Ventilposition des Regelventils mit den realen Messdaten. Weiterführend wurde eine Auswertung des errechneten Druckverlustes und Wärmestroms erstellt. Anhand dieser Auswertungen wurde anschließend die Übertragbarkeit auf andere Läufe am selben LUMEN Testträger nachgewiesen und eine Parameterstudie erstellt. In dieser wurde anhand einer Variation des Drucks am Interface gezeigt, dass Dieser wenig Einfluss auf das Verhalten des Prüfstands stromauf des Regelventils hat. Um die Simulation für Nutzer ohne Vorerfahrung mit EcosimPro nutzbar zu machen, und eine schnelles Arbeiten zu ermöglichen, wurde eine Bedienoberfläche in Excel eingerichtet. Diese wurde so umgesetzt, dass eine direkte Auswertung der Daten in MATLAB möglich wird.

Besonders bewertet wurde die korrekte Wiedergabe des Drucks. Dieses Ziel wurde vollständig erfüllt und die genaue Prädiktion des Drucks wird im stationären, wie auch im transienten Verhalten erreicht. Zu geringen Abweichung kommt es während des Bedrückens der Leitungen, wobei Start- und Endpunkt genau wiedergegeben werden. Die Auswertung des Druckverlusts bestätigt dieses Verhalten. Auch das Verhalten der Regelung und des Regelventils wird mit vergleichbarer Genauigkeit modelliert. Dies ist auf andere Versuchsläufe übertragbar, ohne die Parameter neu zu kalibrieren. Größere Abweichungen zeigt das Modell im Transientverhalten der Temperatur, die, zu Beginn des Primens, sprunghaft auf die erste Änderungen des Drucks reagiert. Mögliche Begründungen für dieses Verhalten wurden in der Arbeit vorgestellt. Trotz dieser Abweichungen wird der Wärmestrom, ab der Öffnung des Ventils zum Interface, genau wiedergegeben. Als weiteres Ziel sind wirtschaftliche Aspekte der Simulation zu nennen. Auch dieses wurde aufgrund der effizienten Bedienung in Excel und der kurzen Rechenzeit der Simulation

erreicht.

Literaturverzeichnis

- [1] DEEKEN, Jan C. ; OSCHWALD, Michael ; SCHLECHTRIEM, Stefan: LUMEN Demonstrator Project Overview. In: *32nd International Symposium on Space Technology and Science* (2019). <https://elib.dlr.de/130877/>
- [2] SIMONTACCHI, P. ; BLASI, R. ; EDEINE, E. ; SAGNIER, S. ; RAVIER, N. ; ESPINOSA-RAMOS, A. ; BRETEAU, J. ; ALTENHOEFER, Ph.: Prometheus: Precursor of new low-cost rocket engine family. (2019). <http://dx.doi.org/10.13009/EUCASS2019-743>. – DOI 10.13009/EUCASS2019-743
- [3] EMPRESARIOS AGRUPADOS: *European Space Propulsion System Simulation ESPSS EcosimPro Libraries User Manual, Version 3.3.0*, 2018
- [4] EMPRESARIOS AGRUPADOS: *CONTROL Library 4.0.3 Reference Manual*, 2015
- [5] SUTTON, George P. ; BIBLARZ, Oscar: *Rocket propulsion elements*. John Wiley & Sons, 2016
- [6] TRAUDT, Tobias ; WAXENEGGER-WILFING, Günther ; HAHN, Robson H. Dos S. ; WAGNER, Bernd ; DEEKEN, Jan: An overview on the turbopump Roadmap for the Lumen Demonstrator engine and on the new turbine test facility. (2017), September. <https://elib.dlr.de/116485/>
- [7] OSCHWALD, Michael: *Raumfahrtantriebe 1*. RWTH Aachen, 2019
- [8] HENSARLING, Paula L.: *Test Facilities Capability Handbook*. Work of the US Gov, 2007
- [9] GRADL, Paul R. ; PROTZ, Chris ; GREENE, Sandra E. ; ELLIS, David ; LERCH, Brad ; LOCCI, Ivan: Development and Hot-fire Testing of Additively Manufactured Copper Combustion Chambers for Liquid Rocket Engine Applications. In: *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, jul 2017
- [10] KAWASHIMA, Hideto ; KUROSU, Akihito ; KOBAYASHI, Teiu ; OKITA, Koichi: Progress of LE-9 Engine Development. (2018), jul. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2018-4458>. – DOI 10.2514/6.2018-4458
- [11] BRÜMMER, Gerd: *Forschungs- und Technologieprüfstand P8*. DLR, Institut für Raumfahrtantriebe, 2016 https://www.dlr.de/ra/Portaldaten/55/Resources/dokumente/2016.04.14_P8_Handout_Bruemmer_final.pdf
- [12] GREUEL, Dirk ; SCHÄFER, Klaus ; SCHLECHTRIEM, Stefan: Test facilities for VINCI®. In: *CEAS Space Journal* 5 (2013), jul, Nr. 1-2, S. 39–48. <http://dx.doi.org/10.1007/s12567-013-0043-8>. – DOI 10.1007/s12567-013-0043-8

- [13] EMPRESARIOS AGRUPADOS: *EcosimPro 2019 Version 6.0 Modelling and Simulation Software Complete Reference Manual*, 2019
- [14] DIRK ABEL, Alexander B.: *Rapid Control Prototyping*. Springer-Verlag GmbH, 2006 https://www.ebook.de/de/product/4649144/dirk_abel_alexander_bollig_rapid_control_prototyping.html. – ISBN 3540295240
- [15] PROF. DR.-ING. DIETER HÄNEL, Matthias M.: *Numerische Strömungsmechanik 1 und 2*. RWTH Aachen, 2019
- [16] MANFRED REUTER, Serge Z.: *Regelungstechnik für Ingenieure*. Vieweg+Teubner Verlag, 2008 https://www.ebook.de/de/product/19312346/manfred_reuter_serge_zacher_regelungstechnik_fuer_ingenieure.html. – ISBN 9783834895042
- [17] JR., Herbert O. ; BÖHLE, Martin ; DOHRMANN, Ulrich: *Strömungsmechanik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2009 https://www.ebook.de/de/product/19312390/herbert_oertel_jr_martin_boehle_ulrich_dohrmann_stroemungsmechanik.html. – ISBN 9783834892485
- [18] Norm DIN EN ISO 5167-2 01 2004. *Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt - Teil 2: Blenden (ISO 5167-2:2003)*
- [19] VDI: *VDI Waermeatlas*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. – ISBN 9783642199813
- [20] HANS DIETER BAEHR, Karl S.: *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer-Verlag GmbH, 2019 https://www.ebook.de/de/product/37079724/hans_dieter_baehr_karl_stephan_waerme_und_stoffuebertragung.html. – ISBN 9783662584415
- [21] HANS-GÜNTHER WAGEMANN, Heinz E.: *Photovoltaik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010 https://www.ebook.de/de/product/19110656/hans_guenther_wagemann_heinz_eschrich_photovoltaik.html. – ISBN 9783834893765
- [22] *Sensortechnik*. Springer-Verlag GmbH, 2015 <https://www.ebook.de/de/product/23580522/sensortechnik.html>. – ISBN 3642299423
- [23] STEPHAN, Karl ; SCHABER, Karlheinz ; MAYINGER, Franz: *Thermodynamik*. Springer-Verlag GmbH, 2013 https://www.ebook.de/de/product/22922202/karl_stephan_karlheinz_schaber_franz_mayinger_thermodynamik.html. – ISBN 9783642300981